Aus der Abteilung für zahnärztliche Werkstoffkunde
(Leiter: Professor Dr. med. dent. Joachim Viohl)
des Instituts für Klinisch-Theoretische Zahn-,
Mund- und Kieferheilkunde
(Geschäftsführender Direktor: Prof. Dr. Heinrich Newesely)
des Fachbereiches Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde
der Freien Universität Berlin

AUFBIEGUNG VON MOD-FÜLLUNGEN IN MESIO-DISTALER RICHTUNG BEI EINWIRKUNG VON KRÄFTEN PARALLEL ZUR ZAHNACHSE

Dissertation
zur
Erlangung der zahnmedizinischen Doktorwürde
am Fachbereich Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde
der Freien Universität Berlin

vorgelegt von
Zahnarzt Martin Zimmer
aus Bremen
1985

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41549620_0003

Aus der Abteilung für zahnärztliche Werkstoffkunde
(Leiter: Professor Dr. med. dent. Joachim Viohl)
des Instituts für Klinisch-Theoretische Zahn-,
Mund- und Kieferheilkunde
(Geschäftsführender Direktor: Prof. Dr. Heinrich Newesely)
des Fachbereiches Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde
der Freien Universität Berlin

AUFBIEGUNG VON MOD-FÜLLUNGEN IN MESIO-DISTALER RICHTUNG BEI EINWIRKUNG VON KRÄFTEN PARALLEL ZUR ZAHNACHSE

Dissertation
zur
Erlangung der zahnmedizinischen Doktorwürde
am Fachbereich Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde
der Freien Universität Berlin

vorgelegt von
Zahnarzt Martin Zimmer
aus Bremen

Referent: Professor Dr. med. dent. Joachim Viohl

Korreferent: Privatdozent Dr. rer. nat. Klaus Dermann

Gedruckt mit Genehmigung des Fachbereiches Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde der Freien Universität Berlin

Promoviert am: 06.12.1985

Meinen Eltern gewidmet

Inhaltsverzeichnis

1. EINLEITUNG 15

1.1. Allgemeines 15

1.2. Ziele der Untersuchung 16

2. HAUPTTEIL 17

2.1. Schrifttumsübersicht 17

2.1.1. Ähnliche Untersuchungen 17

2.1.2. Maximale und physiologische Kaukräfte 17

2.1.3. Materialeigenschaften 19

1. Elastizitätsmodul, 19

2. Proportionalitätsgrenze, 19

3. Dehngrenze, 20

4. Härte, 20

5. Druck- und Zugfestigkeit, 21

6. Zeitabhängige Eigenschaften und 21

7. Linearer thermischer Ausdehnungskoeffizient 23

2.1.4. Zahnanatomie 23

2.1.5. Kavitätenbreite und -form 24

2.1.6. Fehler bei den Verarbeitungsschritten 25

2.1.7. Maßhaltigkeit von Füllungen, Spalten am Kavitätenrand 25

1. nach Herstellung 25

2. nach Gebrauch 25

2.1.8. Meßverfahren zur Messung der Aufbiegung 26

1. berührungslos 26

1.1. magnetisch 26

1.1.1. Hall-Effekt 26

1.1.2. induktiv 26

2.1.8.1.2. elektrisch (kapazitativ) 26

1.3. optisch 27

1.3.1. Interferenzmessungen 27

1.3.2. Messung der Strahlablenkung 27

2. nicht berührungslos 27

2.2. Eigene Untersuchungen 29

2.2.1. Vorversuche 29

1. Entwicklung des Versuchsaufbaues für Wegmessungen 29

1.1. Meßverfahren 29

1.2. Elemente der Versuchsaufstellung 30

1.2.1. Prüfmaschine 30

1.2.2. seitliche Wegaufnehmer 31

1. Meßprinzip (induktives Meßverfahren) 31

2. Form der Kontaktflächen 32

1.2.3. Halterung 32

1. Befestigung der Wegaufnehmer 32

2. Befestigung eines Zahnes 34

1.3. Form der Approximalflächen 34

1.3.1. parallel modellieren oder fräsen 34

1.3.2. Ergebnis 35

1.4. Messungen 35

1.5. Ergebnisse 35

1.5.1. Kippungen und Translationen 35

1.5.2. Einfluß des Trennmittels im Versuchsaufbau 36

1.5.3. Meßgenauigkeit der Versuchseinrichtung 36

1.6. Notwendige Änderungen der Versuchseinrichtung 36

1.6.1. - des Versuchsgeräts 36

1.6.2. - des Meßverfahrens 37

2.2.1.2. Meßfehlerkorrektur 38

2.1. Mathematische Grundlagen 38

2.1.1. Achsensysteme, Definitionen 38

2.1.2. räumliche Vorstellung der Kippbewegung 40

2.1.3. Berechnungen der Kippungen 41

2.1.4. Berechnungsgrundlagen zur Korrektur der Aufbiegung 48

2.1.5. Berechnung der Aufbiegung 60

2.1.6. Hinweise zu dieser Korrekturmöglichkeit 61

1. aus mathematischer Sicht 61

2. aus meßtechnischer Sicht 61

2.1.7. Lage der Belastungspunkte 62

2.2. EDV-Programm zur Fehlerkorrektur (mit manueller Eingabe) 62

2.2.1. Aufgaben des Programms 62

2.2.2. Bedienung 62

3. Zweiter Versuchsaufbau für Wegmessungen 63

3.1. seitliche Wegaufnehmer **A,B** 63

3.1.1. Form der Kontaktflächen 63

3.1.2. Meßpunkte an den Approximalflächen 63

1. mit Spitzen versehen 64

2. spitz modellieren 64

3.1.3. Bewertung 66

3.2. obere Wegaufnehmer **1,2,3** 66

3.2.1. Ausrichten der Wegaufnehmer 66

3.2.2. Reproduzierbarkeit 68

3.3. Grundplatte mit: 69

3.3.1. Stativstangen und 69

3.3.2. Halterung 69

3.4. Befestigung in der Universalprüfmaschine 69

2.2.1.3.5. Versuchsvorbereitungen für die Versuchszähne: 70

3.5.1. Höckerebene polieren und ausrichten 70

3.5.2. Messung an den Okklusalflächen der Versuchszähne 72

3.6. Erfassung der räumlichen Anordnung der Wegaufnehmer 73

3.7. Berechnung der räumlichen Anordnung 74

3.8. Größenordnung der Wegänderung und der Kippung 76

4. Kraftmessungen 77

4.1. Aufzeichnung auf dem Schreiber der Instron 77

4.2. Aufzeichnung auf dem gleichen Mehrkanalschreiber, der für die Wegaufnehmer gebraucht wird: 78

4.2.1. Anpassungsschwierigkeiten 78

4.2.2. Anforderungen an die Anpassung 78

4.2.3. Aufbau des selbstentwickelten Vorverstärkers mit Filtern 78

1. Blockschaltbild mit Erläuterungen 78

2. technische Daten des Vorverstärkers 79

2.1. - allein und 79

2.2. - zusammen mit der Instron 80

4.3. Meßergebnisse bei Aufzeichnung der Kraft nach (2.2.1.)4.2. 80

4.3.1. Untersuchung von Amalgam 80

4.3.2. Untersuchung von Composit 81

5. Abspeicherung aller Messungen und Versuche 82

5.1. Notwendigkeit 82

5.2. benötigte Mittel 83

5.2.1. Computer HP-85A 83

5.2.2. Analog-Digital-Wandler **ADM 08:** 83

1. technische Daten 83

2. Abtastgeschwindigkeit bei Steuerung durch den Computer HP-85A 84

2.2.1.5.2.2.3. mögliche Einlesegeschwindigkeit mit HP-85A 85

4. Geschwindigkeitsschwierigkeiten und deren Lösungen 85

5.3. Impedanzwandler & Multiplexer (I&M) 86

5.3.1. Aufgaben 86

5.3.2. Schaltplan 88

5.3.3. technische Daten 89

5.4. Ansteuereinheit (AE) mit Computer Sharp PC-1500A 89

5.5. Funktionsbeschreibung 91

5.6. Vorteile dieser Lösung 92

6. Programme zur Datenverarbeitung: 94

6.1. - zur Eichung mit Abspeicherung der Konstanten 94

6.1.1. Eichvorgang 94

1. Wegaufnehmer **A,B** für Aufbiegungsmessung 94

2. Wegaufnehmer **1,2,3** für Lageveränderung des Zahnes 94

3. Prüfmaschine 95

4. Einfluß durch sonstige Geräte 95

6.1.2. Hilfestellung eines Programms 95

1. Aufgaben des Programms 95

2. Bedienung 95

6.2. - zum Ausrichten der Wegaufnehmer in der Versuchsaufstellung 96

6.2.1. Vorgang des Ausrichtens 96

1. Wegaufnehmer **A,B** 96

2. Wegaufnehmer **1,2,3** 97

6.2.2. Hilfestellung eines Programms 97

1. Aufgaben des Programms 97

2. Programm- und Registerbeschreibung 98

3. Bedienung 98

2.2.1.6.3. Programm zur Meßwerterfassung mit Abspeicherung 99

6.3.1. Datenmedium 99

1. Cassetten als Speichermedium 99

2. Disketten als Speichermedium 100

6.3.2. Aufgaben des Programms 100

6.3.3. Belegung und Beschreibung der Parameter 101

6.3.4. Bedienung 104

7. Überprüfung des gesamten Versuchsaufbaus 106

8. Abänderung der Versuchsanordnung auf neue Prüfmaschine . . . 106

8.1. Meßwertübertragung 107

8.2. Einrichten der INSTRON 6025 auf den Versuchsablauf 108

8.3. Bedienung 108

2.2.2. Hauptversuche: 109

1. Versuchsaufbau 109

2. Eichen der Meßgeräte und der Prüfeinrichtung 110

3. Untersuchungen 110

3.1. Auswahl der Füllungen 111

3.1.1. - Werkstoffe 111

3.1.2. - Kavitäten 111

3.2. Auswahl der Belastung 111

3.3. Reproduzierbarkeit der Versuchsaufstellung 111

3.4. Messungen 114

3.5. Belastungsspitzen 115

2.2.3. Auswertung der Meßdaten 116

1. Ziele 117

2. Programme 117

2.1. - zum Datentransfer zwischen verschiedenen Rechnern 117

2.2. - Ordnen der Meßdaten 118

2.2.3.2.3. - zum Erstellen von Übersichten und Graphiken 120

2.3.1. Ausdruck von Übersichtslisten 121

2.3.2. Graphische Darstellung 121

2.4. Hilfsprogramme 122

2.2.4. Ergebnisse 123

1. Darstellungsformen 123

1.1. modifiziertes Balkendiagramm 123

1.2. Vierfach-Diagramm 123

1.3. kontinuierliche Aufbiegungskurven 124

2. Reproduzierbarkeit 124

3. Ausmaß der Kippungen 125

3.1. - am Testkörper gemessen 125

3.2. - an den Zähnen gemessen 128

4. Aufbiegungen von Gußfüllungen 128

4.1. Aufbiegungen bei zierlicher Kavität 132

4.2. Aufbiegungen bei untiefer, zierlicher Kavität 133

4.3. Aufbiegungen bei mittlerer Kavität 133

5. Belastungsspitzen 147

6. Amalgamfüllungen 157

7. Übersichtsdarstellung 157

2.2.5. Fehlerbesprechung: 168

1. Wegaufnehmer 168

1.1. seitliche Wegaufnehmer **A,B** 168

1.2. obere Wegaufnehmer **1,2,3** 168

2. Prüfmaschine 168

2.1. INSTRON TTBM mit **Vv&F** 168

2.2. INSTRON 6025 mit Spannungsteiler 169

2.2.5.3. Impedanzwandler und Multiplexer (I&M) 169

4. Analog-Digital-Wandler (ADM 08) 169

5. Meßmikroskop 169

6. Fehlerabschätzung 169

2.3. Diskussion 171

2.3.1. Beurteilung der Meßergebnisse 171

2.3.2. Faktoren, die die Aufbiegung beeinflussen können: 174

1. Retention 174

2. Paßungenauigkeiten der Inlays 176

3. approximaler Anschnitt/Anschliff 176

4. Einsetzen der Inlays 176

5. Rotation um die Z-Achse 177

2.3.3. Lokalisieren der Aufbiegung 177

2.3.4. Energieabsorption 177

2.3.5. Vergleich zwischen künstlichem und natürlichem Kauvorgang 178

2.3.6. Klinische Bedeutung 178

3. ZUSAMMENFASSUNG 180

4. Schrifttumsverzeichnis 182

5. Verzeichnis der verwendeten Geräte 185

6. Programm zur Meßwerterfassung 188

1. EINLEITUNG

1.1. Allgemeines

Zur täglichen Aufgabe gehört beim Zahnarzt die konservative Versorgung von Zähnen im Seitenzahngebiet. Oft handelt es sich dabei um mehrflächige Füllungen, bei denen die Approximalflächen mit betroffen sind. Hierbei stellt man sich die Frage, welches der Füllungsmaterialien am besten bei seinem Patienten geeignet ist, einem weiteren Verlust gesunder Zahnhartsubstanz vorzubeugen. Entscheidend für die Auswahl des Füllungsmaterials ist neben den Kosten sicherlich die Frage, welches am besten sowohl den täglichen äußeren Einflüssen, wie Kauvorgängen, Temperaturwechseln und evtl. auch parafunktionellen Bewegungen widersteht als auch präzise genug zu verarbeiten ist. Zweitens sind die plastischen Füllungen von den Gußfüllungen zu unterscheiden und drittens tritt besonders im Prämolarengebiet die Frage auf, ob der Ästetik besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden sollte. Kernpunkt ist die Randspaltbildung, die den Bakterien ein Eindringen in die unsichtbare, nicht zu reinigende Tiefe ermöglicht und damit die Sekundärkaries entstehen läßt.

Diese Untersuchung beschäftigt sich mit der Frage, ob durch den Einfluß der Kaukräfte Aufbiegungen der Inlays bzw. Füllungen in mesio-distaler Richtung möglich sind.

Es ist zu erwarten, daß sich ein weicheres Material, d.h. ein Material mit kleinerem E-Modul, stärker aufbiegen läßt als ein starres mit großem E-Modul. Demgegenüber bietet ein weiches Material eher die Möglichkeit, die kleineren Fehler bei der Herstellung auszugleichen als ein rigides. Ferner werden plastische Füllungsmaterialien zunächst besser der Kavität angepaßt sein als ein mit vielen Verarbeitungsschritten hergestelltes Inlay. Demgegenüber sind bei der Gußfüllung feinere Ausläufer möglich, die man an den Zahn adaptieren kann, wodurch der Rand- und Zementspalt auf ein Minimum zu bringen ist.

1.2. Ziele der Untersuchung

a. In welchem Maße findet eine Aufbiegung bei Einwirkung von Kräften statt ?

b. Tritt eine Aufbiegung schon im Bereich der physiologischen Kaukräfte oder erst bei seltener vorkommenden maximalen Kräften auf ?

c. Sind Unterschiede zwischen den Füllungen aus verschiedenen Materialien feststellbar ?

d. Ist die Verformung der Füllungswerkstoffe vollkommen reversibel oder zum Teil auch bleibend ?

e. Ist ein Unterschied zwischen kleinen und großen Kavitäten erkennbar ?

2. HAUPTTEIL

2.1. Schrifttumsübersicht

2.1.1. Ähnliche Untersuchungen

Es ist bisher noch keine Arbeit veröffentlicht worden, mit der eine mögliche mesio-distale Aufbiegung von in Zähnen eingegliederten Füllungswerkstoffen nachgewiesen wurde.

Auf das Ausmaß der Aufbiegung haben Größe der Kaukräfte, Materialeigenschaften, Zahnanatomie und Kavitätengröße Einfluß.

2.1.2. Maximale und physiologische Kaukräfte

Es werden unterschiedliche Meßverfahren zur Bestimmung der natürlichen Kaukräfte benutzt, die hier mit den Ergebnissen kurz aufgeführt sind.

UHLIG [19] benutzt einen Meßkopf mit einer Dicke von 10 mm und erhält als durchschnittliche maximale Kaukräfte im Prämolarengebiet 160 - 210 N, im Molarengebiet 200 - 250 N beim bezahnten Gebiß.

GERLACH und NUßBAUM [12] benutzten eine 8 mm dicke U-förmige Beißgabel, womit sie im Prämolarengebiet maximale Kaukräfte von 190 bis 505 N und im Mittel 290 N mit einer Standardabweichung von $\pm$ 76 N, im Molarengebiet maximale Kaukräfte von 250 bis 649 N und im Mittel 414 N mit einer Standardabweichung von $\pm$ 91 N gemessen haben.

EICHNER [8,9,10,11] baute kleine Meßdosen in Zahnersatz ein. Folglich tritt dabei keine wie bei den zuvor genannten Untersuchern erwähnte Bißsperrung auf. Seine durchschnittlichen Kaukräfte beim Zerkleinern von Nahrung liegen bei nur 20 N, bei schwieriger zu zerkleinernden Nahrungsmitteln meist unter 35 N. Die bei seiner Untersuchung erhaltenen maximal erreichten Kaukräfte lagen bis auf eine Ausnahme mit 180,5 N fast immer unter 100 N.

DE BOEVER et al. [4] haben physiologische Kaukräfte ermittelt, die zu 95% unter 16 N liegen und selten 45 - 70 N überstiegen.

Abschließend folgt eine Übersicht der mittleren und maximalen Kaukräfte, gerundet auf ganze Newton (bisher nicht angeführte Werte sind der Arbeit von DE BOEVER et al. [4] entnommen).

Autor	Objekt	mittlere Kaukraft [N]	maximale Kaukraft [N]
ANDERSON	Onlay	71 - 146	---
ATKINSON et al.	vollb. Gebiß	78	---
BEARN	vollb. Gebiß	7 - 15	16 - 44
DE BOEVER et al.	Brücke	11 - 22	24 - 71
EICHNER	vollb. G./Brücke	17 - 22/35	131 - 181
YURKSTAS et al.	vollb. Gebiß	3 - 18	59 - 79

Tab.1: Übersicht der gemessenen Kaukräfte bei Meßverfahren ohne Bißerhöhung

Die physiologischen Kaukräfte liegen bei 20 N, Werte bis ungefähr 70 N werden auch noch häufiger angetroffen, selten jedoch werden Werte bis 180 N erreicht.

Bei Untersuchungen, die eine Bißerhöhung verursachen, werden deutlich höhere Werte angegeben. Durch Nahrungsmittel wird dieser Zustand der Bißerhöhung sicherlich selten hervorgerufen werden, so daß für diese Arbeit solche Werte weniger berücksichtigt werden.

2.1.3. Materialeigenschaften

Hierbei sind folgende Eigenschaften zu nennen:

1. Elastizitätsmodul,
2. Proportionalitätsgrenze,
3. Dehngrenze,
4. Härte,
5. Druck- und Zugfestigkeit,
6. Zeitabhängige Eigenschaften und
7. Linearer thermischer Ausdehnungskoeffizient

- 1. Elastizitätsmodul

Diese Größe gibt Auskunft über den Widerstand eines Materials, sich bei Einwirken von Kräften elastisch, d.h. reversibel zu verformen. Diese Werte werden bei Druck-/Zugspannungsdiagrammen abgelesen. Je größer der Elastizitätsmodul ist, desto kleiner ist die Gefahr einer vorübergehenden Randspaltbildung beim Kauvorgang. Bei einem Material mit einem E-Modul von 100 kN/mm² ergibt sich z.B. bei einem Querschnitt von 2 mm • 2,5 mm und einer Länge von 10 mm bei einer Belastung von 100 N senkrecht zur Längsachse eine freie Aufbiegung von 2 µm, wobei eine unter der Füllung liegende Zement- und Dentinschicht unberücksichtigt bleibt. Bei kleineren Querschnitten ebenso wie bei einem geringeren E-Modul wird unter gleichen Gegebenheiten die Aufbiegung größer.
SOLTÉSZ [18] hat mit Hilfe der Finit-Element-Berechnung an einem 2-dimensionalen Modell gezeigt, daß bei Füllungsmaterialien mit einem größerem E-Modul die Bildung eines okklusalen Randspaltes abnimmt, eine dünne Unterfüllung vorausgesetzt.

- 2. Proportionalitätsgrenze

COMBE [3] beschreibt sie folgendermaßen: "Das ist die Spannung am Ende

des Proportionalitätsbereiches der Spannungs-Dehnungs-Kurve (...). Sie ist ungefähr gleich der Elastizitätsgrenze, jener Grenze also, an der der Werkstoff aufhört, sich elastisch zu verformen und anfängt, sich plastisch zu verformen." Es ist die Spannung also, bei der der E-Modul seine Gültigkeit verliert. Eine kleine Proportionalitätsgrenze ist ungünstiger, da eine bleibende Aufbiegung einer Füllung leichter auftreten kann, ohne dabei Extremwerte an Kaukraft ausüben zu müssen.

- 3. Dehngrenze

Im Gegensatz zum E-Modul, der Aufschluß über die reversible Verformung gibt, zeigt die Dehngrenze den Wert an, bei dem eine Verformung teilweise bleibend ist. Bei einer 0,2% Dehngrenze von 100 N/mm² und den Bedingungen und Einschränkungen wie im Beispiel unter - 1. tritt bei einer Kraft von 500 N eine bleibende Verformung von 20 µm auf. Wie man daraus und aus Tabelle 2 erkennen kann, spielt die Dehngrenze eine große Rolle, da die erforderlichen Kräfte zur bleibenden Deformation nicht allzuweit von den maximalen Kaukräften liegen. Man sollte auch beachten, daß eine 0,2% Dehngrenze angegeben wird, jedoch z.B. die 0,05% Dehngrenze bereits bei kleineren Kräften überschritten wird, so daß auch schon in diesem Bereich eine Öffnung des Randspaltes verursacht wird.

- 4. Härte

Hierunter versteht man den Widerstand eines Materials gegen Eindringen eines Körpers. COMBE [3] betont den Zusammenhang mit der Proportionalitätsgrenze: "Bei Metallen und Legierungen erhält man aus dem Eindringwiderstand wertvolle Informationen, weil diese Eigenschaft direkt mit der Proportionalitätsgrenze im Spannungs-Dehnungs-Diagramm zusammenhängt." Erwähnenswert ist diese Eigenschaft, da bei geringerer Härte eine weiche Legierung einen lokal hohen Druck abbauen kann, dadurch

daß das Metall bleibend zur Seite gepreßt und so die Kraft besser über eine größere Fläche verteilt wird.

- 5. Druck- und Zugfestigkeit

Dazu äußert sich VIOHL [20] folgendermaßen: "Während die Härtemessungen Aussagen über die Festigkeit an der Oberfläche und nur bei Querschnitten auch über die Festigkeit im Innern zulassen, wird bei der Druck- und Zugfestigkeit der gesamte Probenquerschnitt der Belastung ausgesetzt." Die Festigkeit gibt Auskunft, bei welcher Spannung ein Material bricht. Da Kaubewegungen ein Wechselspiel von Druck- und Zugkräften darstellen, erhält man hier einen Vergleich über bessere oder schlechtere Tauglichkeit eines Füllungsmaterials, den täglichen Belastungen zu widerstehen.

- 6. Zeitabhängige Eigenschaften

Hierzu ist bei COMBE [3] folgendes zu lesen: "Bei einigen Werkstoffen, insbesondere Kunststoffen, führt die Aufbringung oder Entfernung einer Last zu einer Verformung, deren Größe zeitabhängig ist. Der jeweilige Elastizitätsmodul ist abhängig von der Verformungsgeschwindigkeit. Der Elastizitätsmodul, der bei einer hohen Verformungsgeschwindigkeit gemessen wird, ist relativ hoch, verglichen mit dem Elastizitätsmodul bei unendlich niedriger Verformungsgeschwindigkeit. Der niedrige Elastizitätsmodul rührt daher, daß innere Spannungen im Laufe der Zeit abgebaut werden." Wie man hieraus erkennen kann, hat die zeitliche Länge der Belastung einer Füllung eine besondere Bedeutung. Da die Kraftspitzen bei Kauvorgängen nach EICHNER [9] von kurzer Dauer sind und im Bereich von 0,05 bis 0,2 s liegen, andererseits Kräfte bei Parafunktionen, wie Aufeinanderpressen der Zähne bei Stresszuständen, von längerer Dauer sind, sollten die Materialeigenschaften unter den verschiedenen Gesichtspunkten untersucht werden.

Eigenschaften / Material	E-Modul [kN/mm²]	Proportionalitätsgrenze [N/mm²]	0,2% Dehngrenze [N/mm²]	Härte Brinell[HB] Vickers[HV] Knoop[HK]	Festigkeit Druck- [N/mm²]	Festigkeit Zug- [N/mm²]	lin. therm. Ausdehnungskoeffizient [10^{-6}/°C]
Schmelz	50-85			350[HK]	100-400	10-35	11-12
Dentin	15-20			70[HK]	200-350	50-60	8
Goldlegierungen	75-105						11-16
Typ 1, weich		60-100	80	50-90 (-)[HV]		170	
Typ 4, extrahart		240-360(-690)	400 (620)	150 (235)[HV]		520 (740)	
Silber-Palladiumleg.	95-100	345-380(-700)		140-170[HB]			
extrahart			320 (940)	140 (310)[HV]		510 (950)	
Amalgam	14-45			110[HK]	300-500	50-70	22-28
Composite	6-18			30-50[HK]	150-350	40-55	20-50

Tab.2 : Materialeigenschaften nach [3,5,7,13,20]

Die Werte in (Klammern) sind nach Aushärtung zu erreichen.

- 7. Linearer thermischer Ausdehnungskoeffizient

Dieser gibt an, um wieviel sich ein Material im Verhältnis zu seinen Abmessungen bei Temperaturänderungen ausdehnt bzw. schrumpft. Ein Inlay mit einer Länge von 10 mm und einem linearen thermischen Ausdehnungskoeffizienten von $10 \bullet 10^{-6}$/°C verlängert sich bei einer Temperaturzunahme um 10 °C um 1 µm, bei 30 °C bereits um 3 µm. Hierbei ist besonders der Unterschied der linearen thermischen Ausdehnungskoeffizienten zwischen Füllungsmaterialien und Zahnhartsubstanz zu beachten. Zusätzlich sollte die Wärmeleitfähigkeit nicht außer Acht gelassen werden, da sich ein Material erst dann in vollem Umfange ausdehnt, wenn es gleichmäßig die Temperatursteigerung mitmacht. Da jedoch Metalle und Legierungen viel besser die Wärme leiten als Schmelz oder Dentin, wird bei kurzzeitigen Temperaturwechseln eher das Metall eine Längenveränderung durchlaufen als die Zahnhartsubstanz. Dadurch sind kurzfristig geringe Randspaltbildungen bei Goldlegierungen, etwas größere bei Füllungskunststoffen und zwar bis 15 µm möglich.

In Tabelle 2 sind die Materialeigenschaften zusammengefaßt.

2.1.4. Zahnanatomie

Im Schrifttum waren keine Hinweise zu finden, inwieweit die Zahn- oder Kavitätenform die Aufbiegung beeinflußt. Es kann jedoch von folgenden Tatsachen ausgegangen werden:
Die Form der Kavitäten ist abhängig von der Zahnform, der Lage und Größe der Höcker, die damit den Verlauf der Fissuren beeinflussen. So sieht man deutlich den Unterschied zwischen oberen Molaren, die einen H-förmigen Fissurenverlauf aufweisen, wodurch ein Inlay eher in der mesio-distalen Aufbiegung behindert wird, und unteren Molaren, die einen recht geraden Fissurenverlauf zwischen den Approximalflächen aufweisen.

Weiterhin ist der mesio-distale Zahndurchmesser bei Molaren größer als bei Prämolaren, wodurch sich ein Inlay mit gleichem bucco-lingualem Querschnitt (in transversaler Ebene), jedoch kürzerer Länge weniger aufbiegt als ein längeres Inlay. Deshalb werden bei dieser Untersuchung nur untere Molaren mit möglichst großem mesio-distalen Durchmesser verwendet.

2.1.5. Kavitätenbreite und -form

Die Ausbreitung der Kavität, sowohl was ihre Tiefe als auch was ihre bucco-linguale Ausdehnung betrifft, ist von der vorhandenen kariösen Läsion abhängig. Bei größerer Tiefe als auch bei größerer Ausdehnung ist eine geringere Aufbiegung in mesio-distaler Richtung zu erwarten. Auch die Größe der approximalen Stufe wird sicherlich einen ähnlichen Einfluß haben.

Neben der allgemeinen Form und Größe eines Inlays sind zur Vermeidung einer Randspaltbildung auch die Präparationsränder und Retentionsformen mit zu betrachten. So können feine Abschrägungen an den Zahn "anfiniert" werden. Dies verursacht jedoch eine Kaltverformung, wodurch das Material spröder wird und eine Bruchgefahr der wohlgemeinten Verbesserung möglich ist (OEHLKE [14]). Durch die Anschrägung soll der Zementspalt so klein wie nur möglich gehalten werden; es sollte jedoch nicht außer Acht gelassen werden, daß die Randspaltgröße proportional dem Sinus des Winkels zwischen Aufbiegungsrichtung und Richtung dieser Anschrägung ist.

Zur Verminderung der Aufbiegung sind Rillen in der approximalen Stufe denkbar. Man sollte jedoch beachten, daß hierbei die Zahnhartsubstanz geschwächt wird, so daß die Nachteile die Vorteile um ein Vielfaches übertreffen.

2.1.6. Fehler bei den Verarbeitungsschritten

Durch die unterschiedlichen Temperaturen bei der mehr oder weniger großen Anzahl der Verarbeitungsschritte tritt eine thermische Expansion bzw. Kontraktion auf. MARXKORS und MEINERS [13] weisen auf folgendes hin: Die elastomeren Abformmaterialien schrumpfen bei Abkühlung "...mit der damit verbundenen verzerrten Vergrößerung der Abformlumen. Dieser Effekt wird verstärkt, wenn zum Ausgießen des Abdruckes Gipsbrei mit Temperaturen noch unter Raumtemperatur verwendet wird." Ihre Untersuchungen zeigen, "daß bei starker Abkühlung der Abdruck Gipsstümpfe liefert, deren Durchmesser bis zu 35 µm größer waren als der des Originals. Bei Abkühlung auf 22 °C betrug die Abweichung immer noch 20 µm, ein Effekt, der sehr wohl berücksichtigt werden muß." Hieraus ist ersichtlich, daß die Verarbeitung eine sehr große Rolle spielt.

2.1.7. Maßhaltigkeit von Füllungen, Spalten am Kavitätenrand

Man kann zu verschiedenen Zeitpunkten den Randschluß einer Füllung untersuchen. Interessant sind vor allem die Spalten, die man nach Herstellung - zum Zeitpunkt der Eingliederung - und nach längerer Tragedauer vorfindet.

- 1. Spalten nach Herstellung

OEHLKE [14] wies Spalten von 150 µm im interdentalen Raum bei der Herstellung von Goldgußfüllungen nach. Mit steigender Härte der Legierung wird die "mittlere klinische Ungenauigkeit" größer. Anpolieren mit Schlagpolierern verschlechtert die klinische Genauigkeit um weitere 40 µm.

- 2. Spalten nach Gebrauch

ALBERT [1] fand heraus, daß Goldgußfüllungen nach einem Jahr Tragezeit eine durschnittliche Spaltbreite von 118 µm mit einer Spalttiefe von 55 µm aufwiesen gegenüber 161 µm Spaltbreite und 72 µm Spalttiefe bei Amalgam-

füllungen. Nach 15-jähriger Tragezeit waren im Mittel 250 µm Spaltbreite und 110 µm Spalttiefe bei Gußfüllungen, 519 µm Spaltbreite und 253 µm Spalttiefe bei Amalgamfüllungen zu messen.

2.1.8. Meßverfahren zur Messung der Aufbiegung

Die Aufbiegung erhält man durch Messung der Wege, die von mesialem und distalem Meßpunkt bei einem Versuch zurückgelegt werden. Es gibt die Möglichkeit,

1. berührungslos oder
2. nicht berührungslos zu messen

- 1. Wegmeßverfahren berührungslos:
Man macht sich dabei das magnetische Feld, elektrische Feld oder die Optik zunutze:

- 1.1. magnetisch

- 1.1.1. Hall-Effekt: man benötigt einen Halleffektsensor, der eine Ausgangsspannung proportional zur Flußdichte (magnetischen Induktion) liefert, und einen Permanentmagneten. Da die Flußdichte jedoch nicht vollkommen linear mit der Wegänderung verläuft, werden aufwendigere Verstärker oder Auswertegeräte benötigt, besonders wenn man im µm-Bereich mißt.

- 1.1.2. induktiv: es werden entweder ein Kern oder eine Spule in einer (manchmal auch zwei) Spule(n) bewegt. Es werden die Unterschiede der Induktivität der Spule(n) gemessen und daraus die Wegänderung ermittelt.

- 1.2. elektrisch (kapazitativ): 2 Kondensatorplatten werden am Versuchsobjekt und an der starren Versuchsaufstellung befestigt. Die Kapazität eines Plattenkondensators ist umgekehrt proportional zum Plattenabstand. Problematisch ist die parallele Ausrichtung der Platten, da der zur Kapazitätsmessung erforderliche geringe Plattenabstand nicht viel Spielraum

offen läßt.

- 1.3. optisch

- 1.3.1. Interferenzmessungen: hierbei wird eine monochromatische Lichtquelle, vorzugsweise ein Laser benötigt. Der auf das Versuchsobjekt gerichtete Lichtstrahl muß zurückgeworfen werden, um den Wechsel zwischen Interferenzmaxima und -minima zählen und auswerten zu können. Die Anzahl der Maxima und Minima ist direkt proportional zur Wegänderung und linear abhängig von der Wellenlänge des verwendeten Lichtes. Schwierigkeiten tauchen jedoch bei der Erfassung der Richtung der Wegänderung auf.

- 1.3.2. Messung der Strahlablenkung: ein feines Strahlenbündel wird auf einen Spiegel, der am Versuchsobjekt befestigt ist, geworfen. Der reflektierte Strahl wird auf einer Mattscheibe unter einer Lupe betrachtet; nach Eichung kann man die Wegänderungen ablesen. Es kann jedoch kein Unterschied gemacht werden, ob tatsächlich eine Wegänderung oder nur eine Rotation des Spiegels/Versuchsobjektes oder eine Kombination von beiden stattgefunden hat.

- 2. Wegmessungen nicht berührungslos

Hierbei ist an erster Stelle das induktive Verfahren zu nennen, obwohl die anderen berührungslosen Verfahren hier auch zur Anwendung kommen können.

Hauptunterschied zu den berührungslosen Meßverfahren ist außer dem notwendigen Kontakt der Wegaufnehmer, daß man jeweils ein abgeschlossenes System hat, bei dem weiter nicht mehr auf die hochpräzise Ausrichtung der einzelnen Komponenten geachtet werden muß. Die Größe der Wegaufnehmer ist auch nicht so bedeutend, da durch Zuhilfenahme von Hebeln der lokale Platzbedarf geringer als bei einem berührungslosen Wegaufnehmer ist.

Zusätzlich zu den den berührungslosen Wegmeßverfahren gleichenden Prinzipien gibt es bei den nicht berührungslosen Wegmeßverfahren noch das potentiometrische Abgreifen einer Spannung an Widerstandsfolien. Jedoch sind als begrenzende Faktoren für die Auflösung und Reproduzierbarkeit der Messungen die Größe der Schleifer und deren im µm-Bereich instabile Position auf dem Widerstandsmaterial zu nennen.

2.2. Eigene Untersuchungen

2.2.1 Vorversuche

- 1. Entwicklung des Versuchsaufbaues für Wegmessungen

- 1.1 Meßverfahren

Abbildung 1 zeigt schematisch den Zahn mit einer Füllung bzw. Inlay und den unterschiedlichen Kraftvektoren; die approximal dargestellten Pfeile zeigen eine mögliche Aufbiegungsrichtung, deren Ausmaß, wenn eine Aufbiegung überhaupt stattfindet und meßbar ist, noch unbekannt ist. Zur besseren Übersicht sind die Kontaktpunktregionen mit **A** und **B** gekennzeichnet.

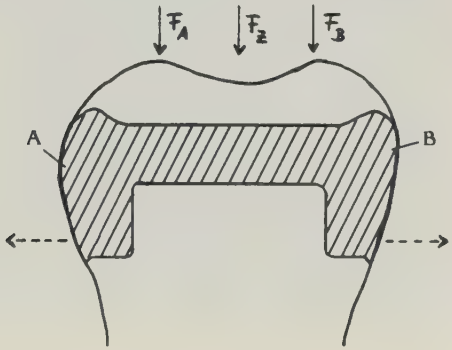


Abb. 1: Zahn mit Füllung bzw. Inlay

F_A vertikale Krafteinwirkung nahe Kontaktpunkt **A**

F_Z vertikale Krafteinwirkung im Zentrum der Füllung (Zahnachse)

F_B vertikale Krafteinwirkung nahe Kontaktpunkt **B**

---- mögliche Aufbiegungsrichtung

Es soll die Aufbiegung einer Füllung in mesio-distaler Richtung gemessen werden, die bei Einwirken artifizieller Kaukräfte auftritt.

Zu diesem Zweck werden extrahierte Zähne präpariert und Inlays angefertigt bzw. Füllungen gelegt. Die Messungen finden außerhalb der Mundhöhle in einer Universalprüfmaschine statt, um definierte Belastungen auf die Füllungen aufbringen zu können.

- 1.2. Elemente der Versuchsaufstellung

In Abbildung 1 ist ersichtlich, daß eine Kraft auf eine Füllung parallel zur Zahnachse einwirken soll. Zu diesem Zwecke benötigt man einerseits eine Energiequelle, die eine Kraft entfalten kann, andererseits einen Zahn, der eine feste Lagebeziehung zur Richtung des Kraftvektors haben muß. Weiterhin soll die indirekte Wirkung der Kraft, die sich eventuell in einer mesio-distalen Längenveränderung äußert, registriert werden, wofür man 2 Wegaufnehmer benötigt.

- 1.2.1. Prüfmaschine

Als Energiequelle, die eine Kraft freigeben kann, dient eine Prüfmaschine von der Firma Instron Typ TTBM . Diese Maschine besteht aus einem Prüfrahmen, der die Meßdosen zur Registrierung der Kraft aufnimmt, einem Schreiber samt Ansteuerelektronik und einem beweglichen Teil, der Traverse, die von 2 seitlichen Spindeln bewegt wird. Die Spindeln werden von einem Motor mit schaltbaren Untersetzungen angetrieben. Man kann die Bewegung der Traverse in Richtung und Geschwindigkeit mit Schaltern steuern. Die kleinste kalibrierte Vor- und Rückschubgeschwindigkeit beträgt bei Gebrauch aller Untersetzungen 0,5 mm/min . Kleinere Werte sind zwar mit Hilfe weiterer Untersetzungsrädchen möglich, werden jedoch weiter nicht benutzt.

Der Schreiber bietet die Möglichkeit der Aufzeichnung der Kraft in Abhängigkeit zur Zeit oder zur Bewegung der Traverse. An der Traverse können Vorrichtungen zur Übertragung der Traversenbewegung auf Prüfkörper

eingespannt werden. Für diese Versuche wird ein Druckstempel eingespannt, der an seiner Spitze eine kleine Stahlkugel trägt (Abb. 2).

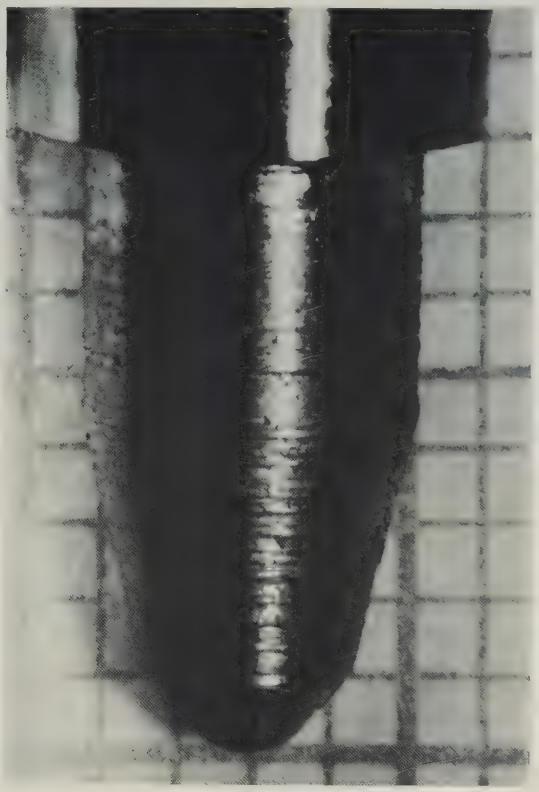


Abb. 2: Spitze des Druckstempels auf unterlegtem mm-Papier.
Unten ist die eingefaßte 2 mm ϕ große Stahlkugel.

- 1.2.2. seitliche Wegaufnehmer

- - 1. Meßprinzip

Die zwei verwendeten Wegaufnehmer Nr.1301 der Firma Mahr Feinprüf arbeiten nach dem induktiven Meßprinzip mittels Spulen. Die Spulen sind in Längsrichtung des zylinderförmigen Gehäuses eingebaut. Es handelt sich dabei um geschlossene Systeme, die nicht berührungslos arbeiten.

Die Richtung der Wegmessung wird von der Achsenlage des Zylinders bestimmt. Jeder Wegaufnehmer ist an ein Meßgerät Typ Millitron desgleichen Herstellers angeschlossen. Es hat die Aufgabe, die für die Weglängenmessung notwendigen Wechselspannungen zu erzeugen, die der Wegaufnehmer moduliert an das Meßgerät zurückgibt. Letzteres setzt die erhaltenen Signale in Gleichspannung um und zeigt diese auf einer linearen Meßskala mit µm-Einteilung an. Die Gleichspannung kann anderen Geräten, z.B. einem Schreiber, zugeführt werden.

- - 2. Form der Kontaktflächen

An der Stirnseite eines Wegaufnehmers besteht die Möglichkeit, verschieden geformte Meßflächen einzuschrauben, wobei bei dieser ersten Versuchsaufstellung kugelige Oberflächen benutzt werden.

- 1.2.3. Halterung

Neben den einzelnen Komponenten des Versuchsaufbaues braucht man eine Halterung zur Aufnahme von Zahn und Wegaufnehmer. Die Halterung besteht aus einer Stahlplatte und 2 seitlichen Schenkeln. Ein Gewindestück von ungefähr 50 mm Länge und 20 mm ϕ wird mit 2 Muttern mit einem Innengewinde von 20 mm ϕ unbeweglich mit der Halterung verbunden. Die Stahlplatte hat eine durchgehende Bohrung von 20 mm ϕ zur Aufnahme des Gewindestücks und eine Vertiefung von 20 mm und 40 mm ϕ zur Aufnahme einer Mutter (Abb. 3). Die mit der Stahlplatte verbundenen seitlichen Schenkel sind oben horizontal unterteilt, um die seitlichen Wegaufnehmer **A** und **B** aufnehmen zu können.

- - 1. Befestigung der Wegaufnehmer

Zwei seitliche Schenkel an der Halterung, die im obersten Abschnitt horizontal unterteilt sind, dienen zur Befestigung der seitlichen Wegaufnehmer **A,B**

mittels der in Abb. 3 oben auf den seitlichen Schenkeln angedeuteten Schrauben.

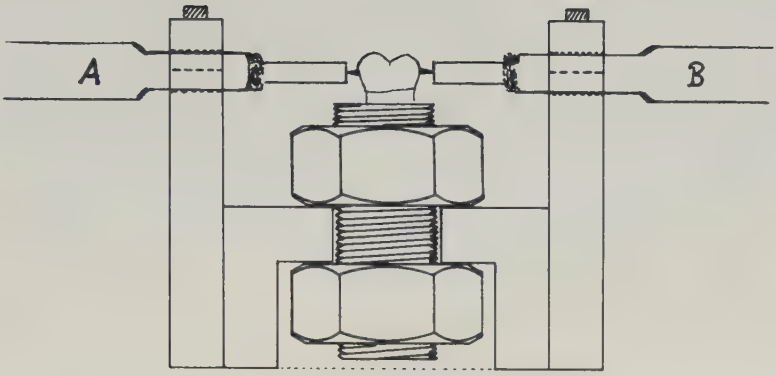


Abb. 3: Halterung von der Seite; links und rechts sind die Wegaufnehmer **A** bzw. **B** in den oben horizontal geteilten, seitlichen Schenkeln eingespannt.
In das mit zwei 30-er Muttern mit einem Innengewinde von 20 mm ϕ befestigte Gewindestück ist ein Zahn eingebettet (Abb. 4).

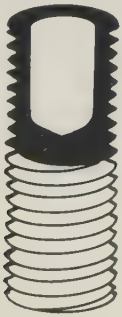


Abb. 4: Längsschnitt durch das Gewindestück mit Bohrung (12 mm ϕ) zur Aufnahme des Zahnes

- - 2. Befestigung eines Zahnes

Ein ungefähr 50 mm langes, mit einer 12 mm ϕ großen Bohrung versehenes Gewindestück dient zur Aufnahme des Zahnes (Abb. 4). Der Zahn wird mit Hartgips Typ 4 nach DIN 13011 in dieses Gewindestück eingebettet; dabei wird zur erleichterten späteren Entfernung des Zahnes die Oberfläche der Bohrung mit einem Trennmittel, z.B. mit Vaseline, bestrichen. Das Gewindestück mit dem Zahn wird in der Halterung so gedreht, daß ein Messen der mesio-distalen Abstandsänderung möglich ist. Mit zwei Muttern wird das Gewindestück gesichert.

- 1.3. Form der Approximalflächen

- 1.3.1. parallel modellieren oder fräsen

Um die mesio-distale Längenveränderung einer Füllung messen zu können, sind Berührungspunkte zwischen Approximalflächen und Wegaufnehmer nötig. Um Fehler durch eventuelle kleine vertikale Translationen auszuschließen, benötigt man je Seite eine zur anderen Seite planparallele Fläche und je Seite eine kugelförmige bis spitze Meßoberfläche.
Bei der Herstellung eines Inlays kann man zu zwei unterschiedlichen Zeiten Parallelität der Approximalflächen anstreben:

bei der Wachsmodellierung des Inlays

bei der Ausarbeitung mittels Fräsen.

Es stellte sich heraus, daß beim Modellieren nicht genügende Parallelität zu erreichen war.
Bei der 2. Möglichkeit wurde ein Bohrständer für zahntechnische Fräsarbeiten benutzt.
Der visuelle Eindruck war trotz mehrerer Versuche nicht viel besser als bei freihändig gefrästen Flächen.

- 1.3.2. Ergebnis

Die Beurteilung der Parallelität unter dem Meßmikroskop ist bei den geringen Abmessungen der Flächen schwierig. Es treten Abweichungen von der Parallelität bis zu 5° auf.

- 1.4. Messungen

Um überhaupt einen Eindruck über das Ausmaß der Aufbiegung zu bekommen, werden zunächst mit einem Palliag-Inlay mit gefrästen Flächen Versuche gemacht. Das Palliag-Inlay, das in einem Kunststoffzahn - einem 2. unteren Molaren der Fa. Frasaco - eingegliedert ist, wurde Belastungen von 500 N ausgesetzt. Die Belastungen wurden deshalb so hoch gewählt, um zu sehen, ob überhaupt Aufbiegungen stattfinden.
Die Spannungen der Ausgänge der Meßgeräte **A** und **B** wurden addiert bzw. subtrahiert.

- 1.5. Ergebnisse

Bei der Addition der Auslenkungen erhält man die mesio-distale Längenzunahme des Inlays, bei der Subtraktion den zweifachen Wert der Verschiebung des Inlays zum einen oder anderen Wegaufnehmer hin.
Die Größenordnung der Aufbiegung bewegt sich im Bereich um 5 µm. Die Verschiebung liegt teilweise oberhalb von diesen Werten.
Eine Aufzeichnung beider Wegaufnehmerauslenkungen erweist sich vorteilhaft, da man nicht nur eine Aufbiegung des Inlays beobachten kann, sondern auch die Verschiebungen der Meßpunkte der Wegaufnehmer registriert.

- 1.5.1. Kippungen und Translationen

Der Verdacht lag aufgrund des relativ großen Ausmaßes dieser Verschiebungen nahe, daß Kippungen des Zahnes mit dem Inlay eine Rolle spielen können.

- 1.5.2. Einfluß des Trennmittels im Versuchsaufbau

Das Trennmittel, das Hartgips vom Gewindestück separiert, hat eine gewisse Dicke, die schätzungsweise bei 0,1 mm liegt. Dadurch werden Bewegungen des Zahnes im Gewindestück begünstigt.

- 1.5.3. Meßgenauigkeit der Versuchseinrichtung

Aufgrund der ungenügenden Parallelität der Approximalflächen in Kombination mit den möglichen Bewegungen des Zahnes kann die gemessene Aufbiegung allein durch diese scheinbar so kleinen Fehler simuliert werden. Nimmt man eine Abweichung der Parallelität von 5° und ein Absinken des Zahnes um 0,1 mm an, dann kann die scheinbare Aufbiegung 8 µm betragen.

- 1.6. Notwendige Änderungen der Versuchseinrichtung

Aus dem obigen Beispiel sieht man deutlich die Notwendigkeit, die Versuchseinrichtung zu verfeinern.

- 1.6.1. Änderungen des Versuchsgeräts

Zusätzlich zu der Messung mit den seitlichen Wegaufnehmern mußte daher die Kippung des Zahnes als zunächst unsichtbarer Meßfehler erfaßt werden. Zu diesem Zweck wird es erforderlich, eine Referenzebene am Zahn abzutasten, z.B. eine Ebene, die durch die Höcker gelegt wird. Um mit derartigen zusätzlichen Messungen Korrekturen der Aufbiegungen machen zu können, sind mehrere Berechnungen nötig, die im Abschnitt Meßfehlerkorrektur (2.2.1.2.) dargestellt sind.

Um Bewegungen des Zahnes während der Versuche zu verringern, ist es notwendig, das Trennmittel zwischen Hartgips und Gewindestück wegzulassen. Dies geschieht bei allen weiteren Versuchen.

- 1.6.2. Änderungen des Meßverfahrens

Da die mangelnde Parallelität der Approximalflächen zu einem großen Unsicherheitsfaktor bei den Ergebnissen wird und damit die Reproduzierbarkeit der Messungen zunichte macht, muß die Messung der mesio-distalen Längenveränderung der Füllung auf andere Weise erfolgen.

Selbst bei parallelen Approximalflächen kann eine Aufbiegung vorgetäuscht werden, wenn der Zahn kippt, da der Abstand zwischen den geneigten parallelen Flächen größer ist als der zwischen den senkrecht zur Meßrichtung stehenden Flächen.

- 2. Meßfehlerkorrektur

Wie aus den Erkenntnissen der ersten Vorversuche ersichtlich ist, wird zur Steigerung der Genauigkeit und damit Aussagekraft der Ergebnisse eine Erfassung der Kippungen des Zahnes notwendig.

- 2.1. Mathematische Grundlagen

Bevor man Berechnungen über 3-dimensionale Kippbewegungen anstellen kann, die man aus den Meßwerten verschiedener Wegaufnehmer erhält, muß man zunächst feste Bezugspunkte bzw. -linien heranziehen.

- 2.1.1. Achsensysteme, Definitionen

Es sollen gleich zwei 3-dimensionale Koordinatensysteme eingeführt werden, deren Koordinaten mit Hilfe von Gleichungen ineinander umgerechnet werden können:

1. Koordinatensystem der Halterung

Die Koordinaten werden mit X, Y und Z dargestellt und werden als ursprüngliche Koordinaten bezeichnet.

Die X-Achse entspricht der gemeinsamen Achse der seitlichen Wegaufnehmer **A** und **B** und ist von **A** nach **B** hin gerichtet.

Die Y-Achse verläuft parallel zur Grundfläche mittig zwischen den Schenkeln der Halterung hindurch. Die Y-Achse ist weg vom Betrachter gerichtet, der die Kontaktregionen **A** links und **B** rechts vor Augen hat (Abb. 3).

Die Z-Achse geht durch den Schnittpunkt der X- und Y-Achse und ist vertikal von der Grundebene der Halterung zum Zahn gerichtet.

2. Koordinatensystem des Zahnes mit Füllung

Die Koordinaten werden mit X', Y' und Z' bezeichnet und neue Koordinaten genannt.

Es handelt sich um Koordinaten im beweglichen Koordinatensystem, das nur festen Bezug zum Zahn hat.

Am Anfang eines Versuches - vor jeder Translation oder Kippung - sind die Koordinaten beider Koordinatensysteme zueinander identisch:

$$X = X' \quad ; \quad Y = Y' \quad ; \quad Z = Z' \quad . \tag{1}$$

Während des Versuches verschiebt und dreht sich das 2. Koordinatensystem gegenüber dem 1. Koordinatensystem. Die drei obengenannten Gleichungen verlieren ihre Gültigkeit.

Nun besteht die Notwendigkeit, die X'-,Y'-,Z'-Koordinaten in die entsprechenden X-,Y-,Z-Koordinaten umzurechnen, damit man die echte Lage der Kontaktpunkte **A** und **B** anhand der registrierten Kippungen und Translationen berechnen kann, so als ob überhaupt keine Bewegung des Zahnes stattgefunden hätte.

Zur Umrechnung der Koordinaten benötigt man die Kosinus der Winkel, die die 'neuen' Achsen mit den 'ursprünglichen' Achsen bilden. BARTSCH [2] gibt dafür die folgenden allgemeinen Gleichungen an:

$$X = X' \cdot \cos \alpha_1 + Y' \cdot \cos \alpha_2 + Z' \cdot \cos \alpha_3 \tag{2}$$

$$X = X' \cdot \cos \beta_1 + Y' \cdot \cos \beta_2 + Z' \cdot \cos \beta_3 \tag{3}$$

$$X = X' \cdot \cos \gamma_1 + Y' \cdot \cos \gamma_2 + Z' \cdot \cos \gamma_3 \tag{4}$$

$$X' = X \cdot \cos \alpha_1 + Y \cdot \cos \beta_1 + Z \cdot \cos \gamma_1 \tag{5}$$

$$X' = X \cdot \cos \alpha_2 + Y \cdot \cos \beta_2 + Z \cdot \cos \gamma_2 \tag{6}$$

$$X' = X \cdot \cos \alpha_3 + Y \cdot \cos \beta_3 + Z \cdot \cos \gamma_3 \tag{7}$$

$\alpha_1, \beta_1, \gamma_1$: Winkel, die die X'-Achse mit den ursprünglichen Achsen bildet.

$\alpha_2, \beta_2, \gamma_2$: Winkel, die die Y'-Achse mit den ursprünglichen Achsen bildet.

α_3, β_3, γ_3 : Winkel, die die Z'-Achse mit den ursprünglichen Achsen bildet.

- 2.1.2. räumliche Vorstellung der Kippbewegung

Die Kippbewegungen finden gleichzeitig um verschiedene Achsen statt. Es ist nicht möglich, die Kippungen mathematisch nacheinander durchzuführen, da man unmöglich sagen kann, welche der Kippungen zuerst und in welchem Ausmaß vorliegt. Da eine Koordinatenumrechnung zwischen den beiden Koordinatensystemen erforderlich ist, muß eine Berechnungsgrundlage geschaffen werden, die von einer einzigen Bewegung ausgeht. Das Gedankenmodell sieht folgendermaßen aus (siehe auch Abb. 8):

Der Punkt (0/0/0) sei das Zentrum, um das alle Kippungen geschehen. Der Vektor der auf die Füllung und den Zahn einwirkenden Kraft verläuft parallel zur Z-Achse und ist zu der Z-Achse entgegengesetzt gerichtet.

Ist der Ausgangspunkt des Kraftvektors in der XZ-Ebene gelegen, so ist nur eine Kippung um die Y-Achse möglich; ist er in der YZ-Ebene gelegen, so geschieht die Kippung nur um die X-Achse.

Die Drehwinkel der Kippungen sind positiv bei einer Rechtsdrehung bei Blick in positive Achsenrichtung.

Nach diesen Sonderfällen kommt nun der allgemeine Fall, bei dem der Ausgangspunkt des Kraftvektors beliebig im Raum zu suchen ist. Jeden Ausgangspunkt dieser ortsgebundenen Kraftvektoren kann man auf einer Geraden, die in Vektorrichtung verläuft, verschieben, da neben der Kraftgröße nur das Lot vom Rotationszentrum zur Geraden des Kraftvektors das Ausmaß des Drehmomentes und damit auch das der Kippung bestimmt.

Deshalb kann man jeden Kraftvektor auch direkt an der XY-Ebene angreifen lassen, ohne daß Änderungen an den Berechnungen entstehen.

Der auf der XY-Ebene senkrecht stehende Ebenenvektor liegt auf der Z-Achse. Ausgangspunkt und Richtung eines neuen Vektors Z_0 sind zu dem Ebenenvektor gleich, die Länge von Z_0 ist mit dem Wert 1 definiert. Durch Einwirken der Kraft wird eine Kippung der XY-Ebene verursacht mit Fixpunkt im Ursprung (0/0/0). Diese Kippung kann man auch am Ebenenvektor registrieren. Dadurch genügt es, die Bewegung des Ebenenvektors zu untersuchen.

Im mathematischen Ansatz werden Drehungen um die Z-Achse ausgeschlossen, da horizontal liegende Kräftepaare von der Versuchsausführung her nicht entstehen können: der Druckstempel berührt einen tiefstgelegenen Punkt der Füllung, also nicht z.B. den Füllungsrand. Durch ein langsames Heranführen des Druckstempels an die Füllung wird dieses erreicht, wobei der Versuchsaufbau eventuell noch leicht vor Beginn des Versuchs verschoben wird.

Da im weiteren nur Kippungen um X- und Y-Achse untersucht werden, liegt die resultierende Rotationsachse in der XY-Ebene.

Nach der kombinierten Kippung erhält man eine neue Richtung des Ebenenvektors; der Vektor Z_0' hat die gleiche Richtung wie der neue Ebenenvektor, ist aber von der Länge her größer als der ursprüngliche Vektor Z_0 : die Z-Komponente des Vektors Z_0' wird hiermit mit dem Wert 1 definiert.

- 2.1.3. Berechnungen der Kippungen

Um Korrekturrechnungen ausführen zu können, muß man zuerst die Kippungen berechnen: es sollte die gesamte Kippung in eine Drehung um die X-Achse und eine Drehung um die Y-Achse aufgeschlüsselt werden.

Um die Kippungen zu berechnen, braucht man Meßwerte über die Lagever-

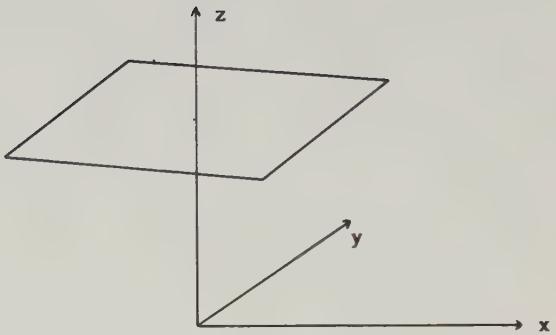


Abb. 5: Höckerebene im Koordinatensystem der Halterung

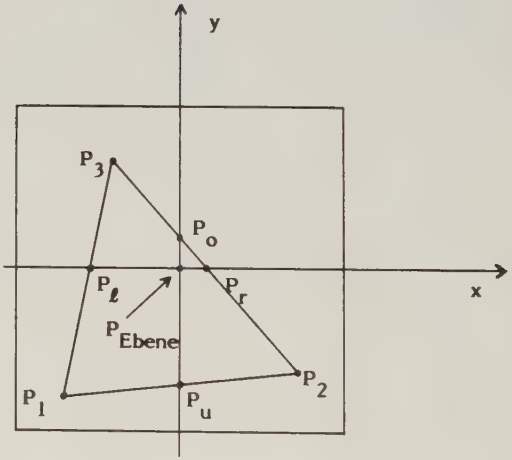


Abb. 6: Aufsicht auf Höckerebene mit Berührungspunkten P_1 , P_2 , P_3 der Wegaufnehmer **1, 2, 3** mit der Höckerebene

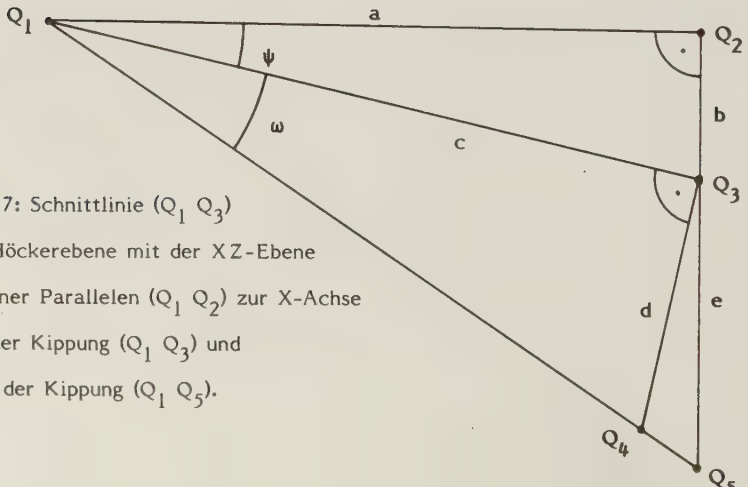


Abb. 7: Schnittlinie (Q_1 Q_3) der Höckerebene mit der XZ-Ebene zu einer Parallelen (Q_1 Q_2) zur X-Achse vor der Kippung (Q_1 Q_3) und nach der Kippung (Q_1 Q_5).

änderung einer Ebene.

Da eine Ebene bereits mit Hilfe von 3 Punkten, die nicht auf einer gemeinsamen Geraden liegen, in ihrer räumlichen Lage charakterisiert wird, genügt es, die Lageveränderungen von 3 Wegaufnehmerspitzen zu erfassen. Es genügt dabei sogar, nur die Z-Komponenten zu messen; X- und Y-Komponenten bleiben während dieser Kippungen konstant: man sollte jedoch bedenken, daß die Punkte vor der Kippung und die Punkte nach der Kippung nicht dieselben sind.

In Abb. 5 ist eine Ebene im 3-dimensionalen Koordinatensystem gezeichnet, die nicht genau parallel zur XY-Ebene verläuft.

In Abb. 6 sieht man die Ebene bei Aufsicht auf die XY-Ebene. Die Meßpunkte der oberen Wegaufnehmer **1**, **2** und **3** sind mit P_1 , P_2 und P_3 bezeichnet. Die Verbindungslinien der drei Punkte kreuzen die XZ-Ebene bzw. die YZ-Ebene. Die Schnittpunkte sind mit P_ℓ und P_r (ℓ=links, r=rechts) bzw. mit P_u und P_o (u=unten, o=oben bei Abb. 6) benannt. Die Koordinaten von P_ℓ , P_r , P_u und P_o lassen sich anhand der Koordinaten von P_1 , P_2 und P_3 berechnen (siehe weiter in diesem Abschnitt). Mit Hilfe der Koordinaten von P_ℓ und P_r läßt sich die Neigung der Ebene zur X-Achse berechnen. Ist eine Kippung erfolgt, so läßt sich mit Hilfe der Punkte P'_ℓ und P'_r die Neigung der gekippten Ebene zur X-Achse berechnen. Die Drehung um die Y-Achse ist die Differenz dieser beiden berechneten Neigungen (zur X-Achse). Da die Winkel selbst für die weiteren Korrekturberechnungen (siehe Abschnitt - 2.1.4.) uninteressant sind, wird nur der Tangens jedes Drehwinkels berechnet. Analog zur Berechnung des Drehwinkels um die Y-Achse geschieht die Berechnung des Drehwinkels um die X-Achse mit Hilfe der Punkte P_u , P_o und der nach der Ebenenkippung vorhandenen Punkte P'_u und P'_o .

Der Tangens vom Neigungswinkel einer Geraden in der XZ-Ebene zur

X-Achse läßt sich leicht berechnen: es ist der Quotient aus der Differenz der Z-Koordinaten zur Differenz der X-Koordinaten zweier Punkte auf der Geraden.

Zunächst sei eine allgemeine Berechnungsgrundlage beschrieben.

In Abb. 7 sind drei rechtwinkelige Dreiecke dargestellt:

1. $Q_1 - Q_2 - Q_3$
2. $Q_1 - Q_3 - Q_4$
3. $Q_1 - Q_2 - Q_5$

Es werden für die weiteren Berechnungen fünf Strecken und zwei Winkel benötigt:

1. $Q_1 - Q_2$: a
2. $Q_2 - Q_3$: b
3. $Q_1 - Q_3$: c
4. $Q_3 - Q_4$: d
5. $Q_3 - Q_5$: e

1. $Q_2 - Q_1 - Q_3$: ψ
2. $Q_3 - Q_1 - Q_5$: ω

Aus Abb. 7 sind folgende Winkelbeziehungen abzulesen:

$$\tan \psi = \frac{b}{a} \qquad (8)$$

$$\tan \omega = \frac{d}{c} \qquad (9)$$

$$\tan(\psi+\omega) = \frac{b + e}{a} \qquad (10)$$

Um den Winkel ω berechnen zu können, braucht man die Strecke d, die man nicht direkt aus den Koordinaten von 2 Punkten und deren Lageveränderung bestimmen kann.

Um dennoch den Tangens dieses Winkels berechnen zu können, benötigt man eine Formel, die die Berechnung des Tangens von der Winkelsumme zweier Winkel zuläßt. Diese kann man BARTSCH [2] entnehmen:

$$\tan(\psi+\omega) = \frac{\tan\omega + \tan\psi}{1 - \tan\omega \cdot \tan\psi} \qquad (11)$$

Aus den Gleichungen (10) und (11) ergibt sich weiter:

$$\frac{b + e}{a} = \frac{\frac{d}{c} + \frac{b}{a}}{1 - \frac{d}{c} \cdot \frac{b}{a}}$$

$$a \cdot \left[\frac{d}{c} + \frac{b}{a} \right] = (b + e) \cdot \left[1 - \frac{d}{c} \cdot \frac{b}{a} \right]$$

$$a^2 \cdot d + a \cdot b \cdot c = (b + e) \cdot (a \cdot c - d \cdot b)$$

$$= a \cdot b \cdot c - b^2 \cdot d + a \cdot c \cdot e - b \cdot d \cdot e$$

$$d \cdot (a^2 + b^2 + b \cdot e) = a \cdot c \cdot e$$

$$d = \frac{a \cdot c \cdot e}{c^2 + b \cdot e} \qquad (12)$$

$$\tan\omega = \frac{d}{c} = \frac{a \cdot e}{c^2 + b \cdot e} \qquad (13)$$

Zur Berechnung der Kippwinkel der Referenzebene werden weitere Gleichungen anhand von Abbildung 6 aufgestellt.

Zuerst werden die Koordinaten von P_ℓ und P_r berechnet, anschließend der Kippwinkel um die Y-Achse aus den Lageveränderungen dieser Punkte während der Bewegung der Referenzebene.

In Vektorschreibweise erhält man die Koordinaten der Punkte P_ℓ und P_r folgendermaßen:

$$\vec{P}_\ell = \vec{P}_1 + f_1 \cdot (\vec{P}_3 - \vec{P}_1) \qquad (14)$$

$$\vec{P}_r = \vec{P}_2 + f_2 \cdot (\vec{P}_3 - \vec{P}_2) \qquad (15)$$

Hierbei sind f_1 und f_2 Faktoren, die im folgenden aus

den Gleichungen entfernt werden. Für die Koordinaten ergibt sich weiter:

$$X_1 + f_1 \cdot (X_3 - X_1) = X_\ell$$
$$Y_1 + f_1 \cdot (Y_3 - Y_1) = 0$$
$$Z_1 + f_1 \cdot (Z_3 - Z_1) = Z_\ell$$

Für f_1 ergibt sich: $f_1 = \frac{Y_1}{Y_1 - Y_3}$

Für die X- und Z-Koordinaten von P_ℓ und P_r erhält man:

$$X_\ell = X_1 + \frac{Y_1}{Y_1 - Y_3} \cdot (X_3 - X_1) \qquad (16)$$

$$Z_\ell = Z_1 + \frac{Y_1}{Y_1 - Y_3} \cdot (Z_3 - Z_1) \qquad (17)$$

$$X_r = X_2 + \frac{Y_2}{Y_2 - Y_3} \cdot (X_3 - X_2) \qquad (18)$$

$$Z_r = Z_2 + \frac{Y_2}{Y_2 - Y_3} \cdot (Z_3 - Z_2) \qquad (19)$$

Die Y-Koordinaten von P_ℓ und P_r haben den Wert 0
Ähnliches gibt es auch für die Koordinaten von P_u und P_o , wobei die X-Koordinaten den Wert 0 haben.

$$Y_u = Y_1 + \frac{X_1}{X_1 - X_2} \cdot (Y_2 - Y_1) \qquad (20)$$

$$Z_u = Z_1 + \frac{X_1}{X_1 - X_2} \cdot (Z_2 - Z_1) \qquad (21)$$

$$Y_o = Y_3 + \frac{X_3}{X_3 - X_2} \cdot (Y_2 - Y_3) \qquad (22)$$

$$Z_o = Z_3 + \frac{X_3}{X_3 - X_2} \cdot (Z_2 - Z_3) \qquad (23)$$

Aus den errechneten Koordinaten der Punkte P_ℓ, P_r, P_u und P_o und den auf gleiche Weise zu errechnenden Koordinaten der Punkte P'_ℓ, P'_r, P'_u und P'_o lassen sich die Tangens der Drehwinkel um X- und Y-Achse

berechnen.

Die Drehung um die Y-Achse errechnet sich folgendermaßen:

$$\tan \beta = - \tan \omega = \frac{- a \bullet e}{c^2 + b \bullet e} \qquad (24)$$

Hierbei sind:

$$a = X_\ell - X_r$$

$$b = Z_\ell - Z_r$$

$$c = \sqrt{(X_\ell - X_r)^2 + (Z_\ell - Z_r)^2}$$

$$e = Z'_\ell - Z'_r - b$$

Die Drehung um die X-Achse errechnet sich folgendermaßen:

$$\tan \alpha = - \tan \omega = \frac{- a \bullet e}{c^2 + b \bullet e} \qquad (25)$$

Hierbei sind:

$$a = Y_o - Y_u$$

$$b = Z_o - Z_u$$

$$c = \sqrt{(Y_o - Y_u)^2 + (Z_o - Z_u)^2}$$

$$e = Z'_o - Z'_u - b$$

Aus den Gleichungen (16) bis (19) (oder auch (20) bis (23)) läßt sich der Schnittpunkt P_{Ebene} der Referenzebene mit der Z-Achse berechnen:

$$Z_{Ebene} = Z_\ell + \frac{X_\ell}{X_\ell - X_r} \bullet (Z_r - Z_\ell) \qquad (26)$$

Benutzt man die Gleichung (26) mit den Koordinaten der Punkte P'_ℓ und P'_r, so ist auch die Translation in Z-Richtung der Referenzebene berechenbar: es ist die Differenz von Z'_{Ebene} und Z_{Ebene}.

Die Translation in Z-Richtung hat jedoch keinen Einfluß auf die Meßergebnisse der Aufbiegung.

- 2.1.4. Berechnungsgrundlagen zur Korrektur der Aufbiegung

Zur Vereinfachung der Überlegungen und Berechnungen wird den Z-Komponenten der Vektoren Z_0 und Z_0' der Wert 1 zugeordnet. In Abb. 8 sieht man das 3-dimensionale, ursprüngliche Koordinatensystem mit dem vom beweglichen Koordinatensystem stammenden Vektor Z_0' ; eine kombinierte Kippung ist bereits ausgeführt.

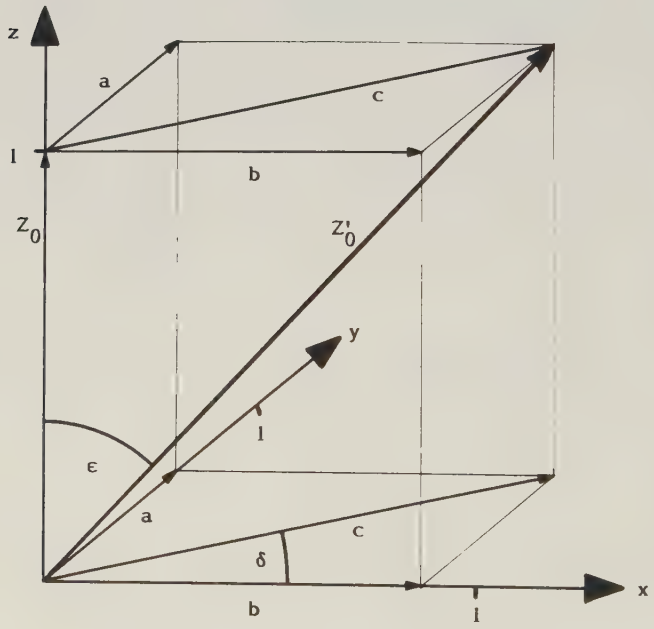


Abb. 8: 3-dimensionales Modell der resultierenden Kippung (siehe Text).

Es werden folgende Vektoren zusätzlich benutzt, wobei hauptsächlich nur die Längen der Vektoren von Interesse sind:

a ist die Y-Komponente des Vektors Z_0' (verursacht durch Kippung um die X-Achse)

b ist die entsprechende X-Komponente (verursacht durch Kippung um die Y-Achse)

c hat die Länge des resultierenden Vektors der Vektoren a und b

$Z_0=1$ ist die Z-Komponente von Vektor Z'_0

Aus der Abb. 8 kann man bereits folgendes ablesen:

$$\cos \alpha_3 = b/Z'_0 \tag{27}$$

$$\cos \beta_3 = a/Z'_0 \tag{28}$$

$$\cos \gamma_3 = 1/Z'_0 \tag{29}$$

Die Länge von Vektor a ist nur abhängig vom Rotationswinkel um die X-Achse: α

$$\tan (-\alpha) = \frac{a}{1} = a \tag{30}$$

Die Länge von Vektor b ist nur abhängig vom Rotationswinkel um die Y-Achse: β

$$\tan \beta = \frac{b}{1} = b \tag{31}$$

Aus der Abb. 8 ist weiter abzulesen:

$$\begin{aligned} Z'_0 &= a^2 + b^2 + Z_0^2 \\ &= a^2 + b^2 + 1 \end{aligned} \tag{32}$$

Die Gleichungen (27) bis (29) kann man jetzt mit Hilfe der Beziehungen (30) bis (32) folgendermaßen schreiben:

$$\cos \alpha_3 = \frac{b}{Z'_0} = \frac{b}{\sqrt{1 + a^2 + b^2}}$$

$$= \frac{\tan \beta}{\sqrt{1 + \tan^2(-\alpha) + \tan^2 \beta}} \tag{33}$$

$$\cos \beta_3 = \frac{a}{Z'_0} = \frac{a}{\sqrt{1 + a^2 + b^2}}$$

$$\cos \beta_3 = \frac{\tan(-\alpha)}{\sqrt{1 + \tan^2(-\alpha) + \tan^2\beta}} \tag{34}$$

$$\cos \gamma_3 = \frac{1}{Z_0'} = \frac{1}{\sqrt{1 + a^2 + b^2}}$$

$$= \frac{1}{\sqrt{1 + \tan^2(-\alpha) + \tan^2\beta}} \tag{35}$$

Für die weiteren Betrachtungen der Kippungen werden ein Vektor und zwei Winkel eingeführt:

$\vec{c}$ ist der resultierende Vektor von $\vec{a}$ und $\vec{b}$: $\vec{c} = \vec{a} + \vec{b}$

Er steht senkrecht zur resultierenden Rotationsachse.

δ sei der Winkel zwischen $\vec{b}$ und $\vec{c}$

ε sei der Winkel zwischen $\vec{Z}_0$ und $\vec{Z}_0'$

Aus Abb. 8 ergeben sich folgende Winkelbeziehungen:

$$\sin \delta = \frac{a}{c} = \frac{\tan(-\alpha)}{\sqrt{\tan^2(-\alpha) + \tan^2\beta}} \tag{36}$$

$$\cos \delta = \frac{b}{c} = \frac{\tan \beta}{\sqrt{\tan^2(-\alpha) + \tan^2\beta}} \tag{37}$$

$$\tan \delta = \frac{a}{b} = \frac{\tan(-\alpha)}{\tan \beta} \tag{38}$$

$$\sin \varepsilon = \frac{c}{Z_0'} = \frac{\sqrt{\tan^2(-\alpha) + \tan^2\beta}}{\sqrt{1 + \tan^2(-\alpha) + \tan^2\beta}} \tag{39}$$

$$\cos \varepsilon = \frac{1}{Z_0'} = \frac{1}{\sqrt{1 + \tan^2(-\alpha) + \tan^2\beta}} \tag{40}$$

$$\tan \varepsilon = \frac{c}{Z_0} = \frac{\sqrt{\tan^2(-\alpha) + \tan^2\beta}}{1} \tag{41}$$

Es gelten noch weitere Winkelbeziehungen zwischen Achsen und Ebenen:

1. Der Winkel zwischen X-Achse und Z-Z'- Ebene ist gleich dem Winkel zwischen X'-Achse und Z-Z'- Ebene.
2. Winkel (Z-O-c) = Winkel (Z'-O-c') = 90°
3. Winkel (Z-O-X) = Winkel (Z'-O-X') = 90°
4. Winkel (c-O-X) = Winkel (c'-O-X') = δ
5. Winkel (Z-O-Z') = Winkel (c-O-c') = ε

Ferner wird der Vektor $\vec{d}$ eingeführt: $\vec{d} \sim \vec{c}$
Nach Rotation erhält man den Vektor $\vec{d}'$: $\vec{d}' \sim \vec{c}'$.

Ferner soll mit einem $\vec{e}$ der Vektor $\vec{d}'$ aus dem Vektor $\vec{d}$ ermittelt werden: $\vec{d}' = \vec{d} + \vec{e}$ (Abb. 9).
Da $\vec{d}$ so konstruiert ist, daß er die Länge $|\vec{d}| = d = \cos \delta$ 1 hat, führt der Vektor $\vec{e}$ auch die X-Achse in die X'-Achse über ausgehend von X = 1 (Abb. 10).

Die weiteren Überlegungen werden gemacht mit $|\vec{X}| = |\vec{X}'| = 1$ und $\vec{X}' = \vec{X} + \vec{e}$.

In Abbildung 9 sieht man folgende Zusammenhänge:

$d = d'$

$$\sin \varepsilon = \frac{-d'_z}{d'} \tag{42}$$

$$\cos \varepsilon = \frac{d'_0}{d'} = \frac{d'_0}{d} = \frac{d'_x}{d_x} = \frac{d'_y}{d_y} \tag{43}$$

$$\tan \varepsilon = \frac{-d'_z}{d'_0} \tag{44}$$

In Abbildung 10 sieht man folgende Beziehungen:

$$d_x = d \bullet \cos \delta = \cos^2 \delta \tag{45}$$

$$d_y = d \bullet \sin \delta = \sin \delta \bullet \cos \delta \tag{46}$$

$$d_z = 0 \tag{47}$$

Aus den obenstehenden Gleichungen und $d_0'^2 = d_x'^2 + d_y'^2$ ergibt sich:

$$d_x' = d_x \cdot \cos \varepsilon = \cos^2\delta \cdot \cos \varepsilon \tag{48}$$

$$d_y' = d_y \cdot \cos \varepsilon = \sin \delta \cdot \cos \delta \cdot \cos \varepsilon \tag{49}$$

$$\begin{aligned} d_z' &= -d_0' \cdot \tan \varepsilon = -\sqrt{d_x'^2 + d_y'^2} \cdot \tan \varepsilon \\ &= -\sqrt{\cos^4\delta \cdot \cos^2\varepsilon + \sin^2\delta \cdot \cos^2\delta \cdot \cos^2\varepsilon} \cdot \tan \varepsilon \\ &= -\sqrt{\cos^2\varepsilon \cdot \cos^2\delta \cdot (\cos^2\delta + \sin^2\delta)} \cdot \tan \varepsilon \\ &= -\cos \varepsilon \cdot \cos \delta \cdot \frac{\sin \varepsilon}{\cos \varepsilon} = -\cos \delta \cdot \sin \varepsilon \end{aligned} \tag{50}$$

Aus $\vec{e} = \vec{d}' - \vec{d}$ und $\vec{X}' = \vec{X} + \vec{e}$ ergibt sich durch Einsetzen:

$$\begin{aligned} X_x' &= 1 + e_x \\ &= 1 + d_x' - d_x \\ &= 1 + \cos^2\delta \cdot \cos \varepsilon - \cos^2\delta \\ &= \sin^2\delta + \cos^2\delta \cdot \cos \varepsilon \end{aligned} \tag{51}$$

$$\begin{aligned} X_y' &= e_y \\ &= d_y' - d_y \\ &= \sin \delta \cdot \cos \delta \cdot \cos \varepsilon - \sin \delta \cdot \cos \delta \\ &= \sin \delta \cdot \cos \delta \cdot (\cos \varepsilon - 1) \end{aligned} \tag{52}$$

$$\begin{aligned} X_z' &= e_z \\ &= d_z' - d_z \\ &= -\cos \delta \cdot \sin \varepsilon \end{aligned} \tag{53}$$

Um die weiteren Gleichungen übersichtlicher zu gestalten, werden die Symbole T_x, T_y, T_0 und T_g eingeführt, denen folgende Werte zugewiesen werden:

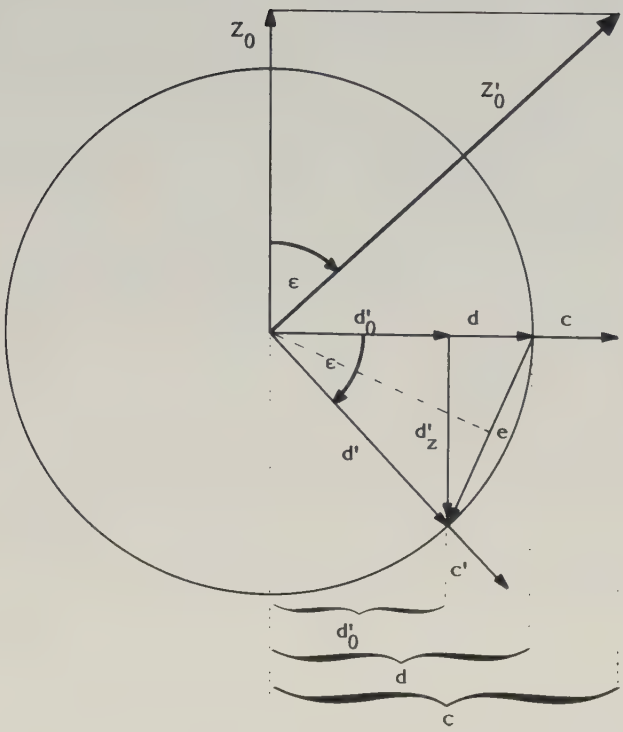


Abb. 9: Ebene senkrecht zur resultierenden Rotationsachse (siehe Text). Sicht in negative X-Richtung.

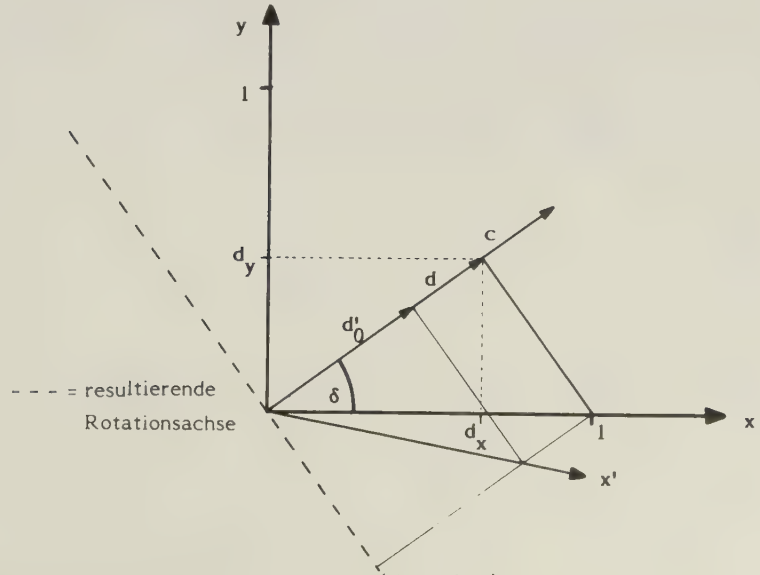


Abb. 10: Sicht von oben auf XY-Ebene (siehe Text).

$$T_x = \tan(-\alpha) \tag{54}$$

$$T_y = \tan \beta \tag{55}$$

$$T_0 = \tan^2(-\alpha) + \tan^2\beta \tag{56}$$

$$T_g = \sqrt{1 + \tan^2(-\alpha) + \tan^2\beta} \tag{57}$$

Mit Hilfe der Gleichungen (36) bis (41) und (54) bis (57) erhält man:

$$X'_x = \frac{T_x^2}{T_0} + \frac{T_y^2}{T_0 \cdot T_g} \tag{58}$$

$$X'_y = \frac{T_x \cdot T_y}{\sqrt{T_0} \cdot \sqrt{T_0}} \cdot \left[\frac{1}{T_g} - 1 \right]$$

$$= \frac{T_x \cdot T_y}{T_0} \cdot \left[\frac{1}{T_g} - 1 \right] \tag{59}$$

$$X'_z = \frac{-T_y}{\sqrt{T_0}} \cdot \frac{\sqrt{T_0}}{T_g} = \frac{-T_y}{T_g} \tag{60}$$

Da sowohl der Vektor X als auch der Vektor X' die Länge 1 haben, ergibt sich für die Kosinus der Winkel:

$$\cos \alpha_1 = \frac{X'_x}{|\vec{X}'|} = \frac{T_x^2}{T_0} + \frac{T_y^2}{T_0 \cdot T_g} \tag{61}$$

$$\cos \beta_1 = \frac{X'_y}{|\vec{X}'|} = \frac{T_x \cdot T_y}{T_0} \cdot \left[\frac{1}{T_g} - 1 \right] \tag{62}$$

$$\cos \gamma_1 = \frac{X'_z}{|\vec{X}'|} = \frac{-T_y}{T_g} \tag{63}$$

Berechnung der Kosinus der Winkel, die zwischen Y'-Achse und den X-, Y- und Z-Achsen gebildet werden.

Es gelten folgende Winkelbeziehungen zwischen Achsen und Ebenen:

1. Der Winkel zwischen Y-Achse und Z-Z'- Ebene ist gleich dem Winkel zwischen Y'-Achse und Z-Z'- Ebene.
2. Winkel (Z-O-c) = Winkel (Z'-O-c') = 90°
3. Winkel (Z-O-Y) = Winkel (Z'-O-Y') = 90°
4. Winkel (c-O-Y) = Winkel (c'-O-Y') = 90° - δ
5. Winkel (Z-O-Z') = Winkel (c-O-c') = ε

Ferner wird der Vektor $\vec{g}$ eingeführt: $\vec{g} \sim \vec{c}$
Nach Rotation erhält man den Vektor $\vec{g}'$: $\vec{g}' \sim \vec{c}'$.

Ferner soll mit einem $\vec{h}$ der Vektor $\vec{g}'$ aus dem Vektor $\vec{g}$ ermittelt werden: $\vec{g}' = \vec{g} + \vec{h}$ (Abb. 11).
Da $\vec{g}$ so konstruiert ist, daß er die Länge $|\vec{g}| = g = \sin \delta$ 1 hat, führt der Vektor $\vec{h}$ auch die Y-Achse in die Y'-Achse über ausgehend von Y = 1 (Abb. 12).

Die weiteren Überlegungen werden gemacht mit $|\vec{Y}| = |\vec{Y}'| = 1$ und $\vec{Y}' = \vec{Y} + \vec{h}$.

In Abbildung 11 sieht man folgende Zusammenhänge:

$g = g'$

$$\sin \varepsilon = \frac{-g'_z}{g'} \tag{64}$$

$$\cos \varepsilon = \frac{g'_0}{g'} = \frac{g'_0}{g} = \frac{g'_x}{g_x} = \frac{g'_y}{g_y} \tag{65}$$

$$\tan \varepsilon = \frac{-g'_z}{g'_0} \tag{66}$$

In Abbildung 12 sieht man folgende Beziehungen:

$$g_x = g \bullet \cos\delta = \cos\delta \bullet \sin\delta \tag{67}$$

$$g_y = g \bullet \sin\delta = \sin^2\delta \tag{68}$$

$$g_z = 0 \tag{69}$$

Aus den obenstehenden Gleichungen und $g_0'^2 = g_x'^2 + g_y'^2$ ergibt sich:

$$g_x' = g_x \bullet \cos\varepsilon = \cos\delta \bullet \sin\delta \bullet \cos\varepsilon \tag{70}$$

$$g_y' = g_y \bullet \cos\varepsilon = \sin^2\delta \bullet \cos\varepsilon \tag{71}$$

$$\begin{aligned} g_z' &= -g_0' \bullet \tan\varepsilon = -\sqrt{g_x'^2 + g_y'^2} \bullet \tan\varepsilon \\ &= -\sqrt{\cos^2\delta \bullet \sin^2\delta \bullet \cos^2\varepsilon + \sin^4\delta \bullet \cos^2\varepsilon} \bullet \tan\varepsilon \\ &= -\sqrt{\sin^2\delta \bullet \cos^2\varepsilon \bullet (\cos^2\delta + \sin^2\delta)} \bullet \tan\varepsilon \\ &= -\sin\delta \bullet \cos\varepsilon \bullet \frac{\sin\varepsilon}{\cos\varepsilon} = -\sin\delta \bullet \sin\varepsilon \end{aligned} \tag{72}$$

Aus $\vec{h} = \vec{g}' - \vec{g}$ und $\vec{Y}' = \vec{Y} + \vec{h}$ ergibt sich durch Einsetzen:

$$\begin{aligned} Y_x' &= h_x \\ &= g_x' - g_x \\ &= \cos\delta \bullet \sin\delta \bullet \cos\varepsilon - \cos\delta \bullet \sin\delta \\ &= \cos\delta \bullet \sin\delta \bullet (\cos\varepsilon - 1) \end{aligned} \tag{73}$$

$$\begin{aligned} Y_y' &= 1 + h_y \\ &= 1 + g_y' - g_y \\ &= 1 + \sin^2\delta \bullet \cos\varepsilon - \sin^2\delta \\ &= \cos^2\delta + \sin^2\delta \bullet \cos\varepsilon \end{aligned} \tag{74}$$

$$\begin{aligned} Y_z' &= h_z \\ &= g_z' - g_z \\ &= -\sin\delta \bullet \sin\varepsilon \end{aligned} \tag{75}$$

Mit Hilfe der Gleichungen (36) bis (41) und (54) bis (57) erhält man:

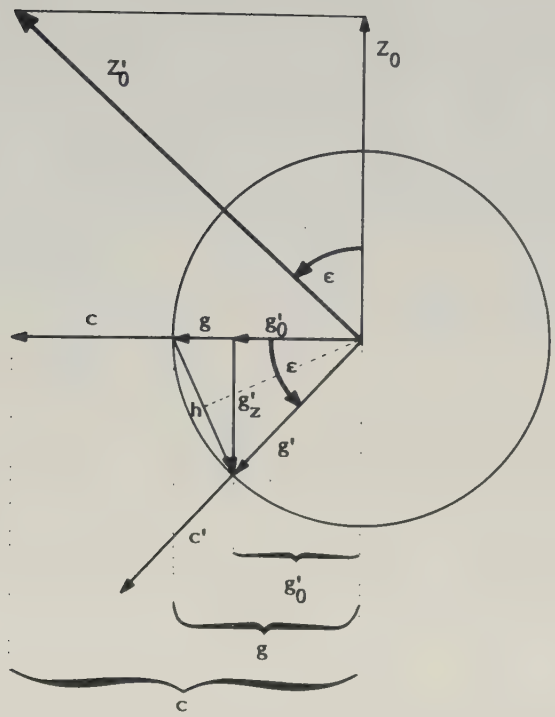


Abb. 11: Ebene senkrecht zur resultierenden Rotationsachse (siehe Text). Sicht in negative Y-Richtung.

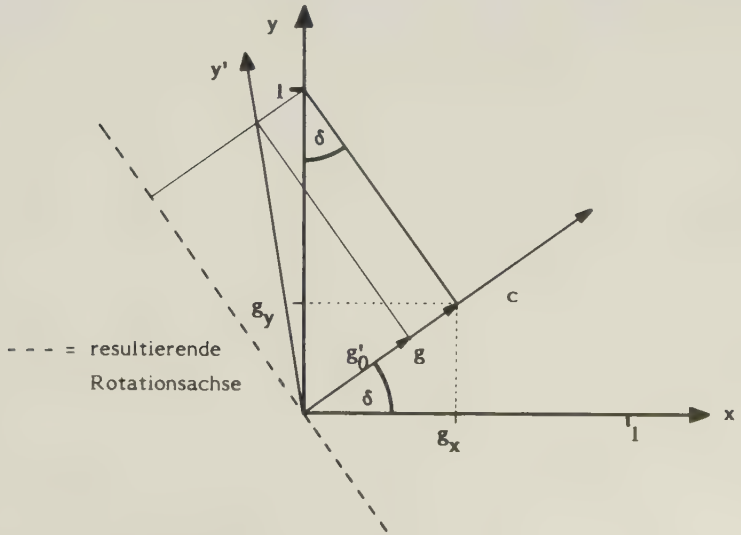


Abb. 12: Sicht von oben auf XY-Ebene (siehe Text).

$$Y'_x = \frac{T_y \cdot T_x}{\sqrt{T_0} \cdot \sqrt{T_0}} \cdot \left[\frac{1}{T_g} - 1 \right]$$

$$= \frac{T_y \cdot T_x}{T_0} \cdot \left[\frac{1}{T_g} - 1 \right] \qquad (76)$$

$$Y'_y = \frac{T_y^2}{T_0} + \frac{T_x^2}{T_0 \cdot T_g} \qquad (77)$$

$$Y'_z = \frac{-T_x}{\sqrt{T_0}} \cdot \frac{\sqrt{T_0}}{T_g} = \frac{-T_x}{T_g} \qquad (78)$$

Da sowohl Vektor Y als auch Vektor Y' die Länge 1 haben, ergibt sich für die Kosinus der Winkel:

$$\cos \alpha_2 = \frac{Y'_x}{|\vec{Y}'|} = \frac{T_y \cdot T_x}{T_0} \cdot \left[\frac{1}{T_g} - 1 \right] \qquad (79)$$

$$\cos \beta_2 = \frac{Y'_y}{|\vec{Y}'|} = \frac{T_y^2}{T_0} + \frac{T_x^2}{T_0 \cdot T_g} \qquad (80)$$

$$\cos \gamma_2 = \frac{Y'_z}{|\vec{Y}'|} = \frac{-T_x}{T_g} \qquad (81)$$

Die Gleichungen (33) bis (35) sind anschließend in der gleichen Darstellungsform aufgeführt:

$$\cos \alpha_3 = \frac{T_y}{T_g} \qquad (82)$$

$$\cos \beta_3 = \frac{T_x}{T_g} \qquad (83)$$

$$\cos \gamma_3 = \frac{1}{T_g} \qquad (84)$$

Bisher wurden nur Rotationen um X- und Y-Achse betrachtet.

Während die Rotation um die Z-Achse ausgeschlossen wurde, bleiben noch die 3 Translationen in X-, Y- und Z-Richtung.

Die gesamte Abbildung soll in 2 Phasen ablaufen:

erst die Rotationen,

dann die Translationen.

Um aber z.B. die Ausgangskoordinaten eines Punktes zu ermitteln, dessen endgültige Koordinaten im ursprünglichen Koordinatensystem nur bekannt sind, so führt man erst die Translationen in entgegengesetzter Richtung aus und danach die inversen Rotationen.

Zur weiteren Vereinfachung der Schreibweise seien:

$$A_1 = \cos \alpha_1 \quad ; \quad B_1 = \cos \beta_1 \quad ; \quad C_1 = \cos \gamma_1 \qquad (85)$$

$$A_2 = \cos \alpha_2 \quad ; \quad B_2 = \cos \beta_2 \quad ; \quad C_2 = \cos \gamma_2 \qquad (86)$$

$$A_3 = \cos \alpha_3 \quad ; \quad B_3 = \cos \beta_3 \quad ; \quad C_3 = \cos \gamma_3 \qquad (87)$$

Unter Berücksichtigung der Translationen werden aus den Gleichungen (2) bis (7) :

$$X = X' \cdot A_1 + Y' \cdot A_2 + Z' \cdot A_3 + X_t \qquad (88)$$

$$Y = X' \cdot B_1 + Y' \cdot B_2 + Z' \cdot B_3 + Y_t \qquad (89)$$

$$Z = X' \cdot C_1 + Y' \cdot C_2 + Z' \cdot C_3 + Z_t \qquad (90)$$

$$X' = (X - X_t) \cdot A_1 + (Y - Y_t) \cdot B_1 + (Z - Z_t) \cdot C_1 \qquad (91)$$

$$Y' = (X - X_t) \cdot A_2 + (Y - Y_t) \cdot B_2 + (Z - Z_t) \cdot C_2 \qquad (92)$$

$$Z' = (X - X_t) \cdot A_3 + (Y - Y_t) \cdot B_3 + (Z - Z_t) \cdot C_3 \qquad (93)$$

X_t , Y_t und Z_t sind die Translationen in Richtung der gleichnamigen Achsen (X;Y;Z).

- 2.1.5. Berechnung der Aufbiegung

Da alle Messungen im ursprünglichen Koordinatensystem erfolgen, müssen die Koordinaten der Meßpunkte **A** und **B** vom beweglichen ins ursprüngliche Koordinatensystem umgerechnet werden.

Es sei zunächst der Fall angenommen, die Füllung biegt sich nicht auf: wenn keine Kippungen auftreten, dann ändern sich die Meßwerte von Wegaufnehmer **A** und **B** - falls überhaupt - gleichsinnig und in gleichem Ausmaß; kippt der Zahn mit der Füllung, dann sind die Meßwerte von **A** und **B**, die man vor dem Versuch gemessen hat und die stabil im beweglichen Koordinatensystem bleiben (es soll ja zunächst der Fall ohne Aufbiegung untersucht werden), nach den Kippungen ins ursprüngliche Koordinatensystem umzurechnen, um dann weitere Vergleiche anzustellen.

Nach diesem idealen Fall ist jetzt der allgemeine Fall zu besprechen, bei dem zusätzlich noch eine Aufbiegung stattfindet. Um festzustellen, ob eine Aufbiegung stattgefunden hat, berechnet man erst die Koordinaten von **A** und **B** im ursprünglichen Koordinatensystem unter der Annahme, daß keine Aufbiegung stattgefunden hat; dann vergleicht man die daraus berechneten X-Koordinaten mit den gefundenen X-Koordinaten (ursprüngliche Koordinaten + Wegaufnehmerauslenkungen). Daraus läßt sich ein Aufbiegungsfaktor berechnen: er ist ein Maß, um wieviel die Füllung in ihrer mesio-distalen Länge zugenommen hat. Da unbekannt ist, auf welche Art und Weise die Aufbiegung geschieht, wird für die Berechnungen der ungünstigste Fall angenommen, daß sich die Füllung in allen drei Dimensionen gleichmäßig vergrößert. Man multipliziert also die gesamte mesio-distale Abmessung der Füllung mit dem Aufbiegungsfaktor und subtrahiert davon die ursprüngliche Länge. Damit erhält man die Aufbiegung der Füllung. Da die Längsachse der Füllung nicht unbedingt mit der Richtung der X--Achse übereinstimmt, sollte dieser Wert noch durch den Kosinus des

Winkels dieser Abweichung dividiert werden.

- 2.1.6. Hinweise zu dieser Korrekturmöglichkeit

- - 1. aus mathematischer Sicht

Bisher wurde als Rotationszentrum der Punkt (0/0/0) angenommen. Da jedoch jede Kippung um einen beliebigen Punkt auf eine Rotation um den Punkt (0/0/0) mit Translationen in X-, Y- und Z-Richtung zurückgeführt werden kann, ändert sich nichts an den aufgestellten Gleichungen.
Da der Rotationspunkt mit den Meßwerten von drei zusätzlichen Wegaufnehmern nicht berechenbar ist, kann nicht unterschieden werden, ob die Aufbiegung mesial und distal gleichmäßig oder unterschiedlich erfolgt. Als Translation in X-Richtung wird der Mittelwert der beiden Auslenkungen der Wegaufnehmer **A** und **B** angenommen: diese Translation dient nur zur Einschätzung der Bewegung der Meßpunkte **A** und **B**; sie hat keinen Einfluß bei der Berechnung der Aufbiegung.
Eine Korrektur von Drehungen um die Z-Achse ist nicht berücksichtigt. Da man nicht weiß, auf welche Art und Weise sich die Füllungen aufbiegen, wird für die Berechnungen eine gleichmäßige Längenzunahme der Füllungen vorausgesetzt.

- - 2. aus meßtechnischer Sicht

Es werden nur die X-Koordinaten der Punkte **A** und **B** bei den Messungen erfaßt; eine Registrierung der anderen Koordinaten ist wegen des geringen zur Verfügung stehenden Platzes nicht möglich. Deshalb kann auch keine Aussage über Translationen des Zahnes in X- bzw. Y-Richtung gemacht werden. Diese haben jedoch keinen Einfluß bei der Angabe der gesamten Aufbiegung von mesial und distal.

- 2.1.7. Lage der Belastungspunkte

Bei Belastungen im Zentrum der Füllungen (Z) wird nur eine Translation in Z-Richtung (Absinken) erwartet.
Bei exzentrischer Belastung (A,B) sind zusätzlich auch noch Kippungen zu erwarten, besonders um die Y-Achse.

- 2.2. EDV-Programm zur Fehlerkorrektur (mit manueller Eingabe)

- 2.2.1. Aufgaben des Programms

Berechnung der Punkte P_ℓ , P_r , P_u und P_o
Berechnung der Kippungen und der Translation in Z-Richtung
Berechnung der Aufbiegung

- 2.2.2. Bedienung

Eingabe der Koordinaten der Berührungspunkte zwischen Zahn bzw. Füllung und Wegaufnehmern
Eingabe des Winkels zwischen Längsachse der Füllung und X-Achse
Eingabe von Umrechnungsfaktoren von Wegaufnehmerauslenkung zu Schreiberausschlag
Eingabe der Schreiberausschläge

Es erfolgt die Ausgabe der Kippungen um die X- und Y-Achse mit der Translation in Z-Richtung sowie die errechnete Aufbiegung mit und ohne Korrektur der Meßwerte durch Kippungen. Es wird auch noch die gemittelte Auslenkung der Wegaufnehmer **A,B** als 'Translation in X-Richtung' angegeben.

- 3. Zweiter Versuchsaufbau für Wegmessungen

Um die Nachteile der ersten Versuchseinrichtung zu beseitigen und um die Möglichkeiten einer Korrektur der Meßwerte unter Zuhilfenahme von weiteren Registrierungen zu gestatten, werden einige Änderungen vorgenommen.

- 3.1. seitliche Wegaufnehmer A,B

- 3.1.1. Form der Kontaktflächen

Die bisher verwendeten kugelförmigen Kontaktflächen der Wegaufnehmer sind aufgrund der Unmöglichkeit einer bei verschiedenen Füllungen gleichen Parallelität der Approximalflächen nicht geeignet. Deshalb werden plane, polierte Einsätze verwendet. Hiermit erreicht man eine ausreichende Parallelität der Meßflächen; außerdem ist die Form der Approximalflächen nun nicht mehr von so bedeutendem Einfluß. Es sollte jedoch möglichst ein punktförmiger Kontakt zwischen Füllung und Kontaktfläche der Wegaufnehmer geschaffen werden.

- 3.1.2. Meßpunkte an den Approximalflächen

Um einen punktförmigen Kontakt zwischen einem Wegaufnehmer mit seinen plan geschliffenen und polierten Kontaktflächen und der Füllung zu erreichen, ist es erforderlich, spitze Ausläufer an den Füllungen anzubringen (Abb. 13).

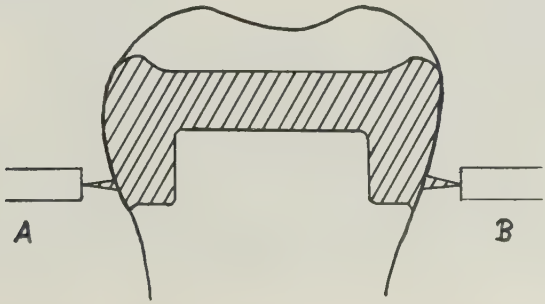


Abb. 13: Füllung mit spitzen Ausläufern, die mit planen Meßflächen der Wegaufnehmer in Berührung kommen.

Da bei den Versuchen verschiedene Füllungsmaterialien zum Vergleich herangezogen werden sollen, sind diese spitzen Ausläufer unterschiedlich zu gestalten.

- - 1. mit Spitzen versehen

Bei Amalgamfüllungen gibt es aufgrund der geringen Randständigkeit keine Möglichkeit, spitze Ausläufer zu modellieren. Um dennoch Spitzen an den Approximalflächen der Amalgamfüllungen (Abb. 14) zu erhalten, wird die Matrize gingival ca. 0,3 mm oberhalb der approximalen Stufe von einem kurzen, angerauhten 0,5 mm ϕ dicken kieferorthopädischen Draht durchbohrt. Zur zusätzlichen Retention wird das Ende des Drahtes, das in der Amalgamfüllung verankert wird, etwas umgebogen. Beim Stopfen ist darauf zu achten, daß das Amalgam gut in den approximalen Stufen kondensiert wird, um ein Herausfallen der Drähte zu vermeiden. Das Abnehmen der Matrize muß sehr sorgfältig und vorsichtig geschehen, da ein zufälliges Berühren der Drahtspitzen sehr leicht einen Bruch der Füllung zur Folge hat. Daher wird die Matrize erst einige Stunden nach dem Legen der Füllung entfernt, obwohl dadurch die Füllungsränder nicht gut modelliert werden können; ein späteres Nachbearbeiten der Füllung mit Finierern ist dann unumgänglich.
Nach 48 Stunden werden die Drahtenden angespitzt.

- - 2. spitz modellieren

Nachdem das Inlay nach der direkten Methode modelliert ist, wird jeweils ein kleiner Punkt am gingivalen Rand der Stufe mit der Spitze eines kleinen Wachsmessers oder eines Le-Cron-Instrumentes gesetzt; dieser Punkt wird zu einer Spitze "gezogen", indem man mit der flachen Seite der Schneide eines Wachsmessers Wachs im noch gerade flüssigen Zustand mit diesem Punkt in Berührung bringt. Durch Ausnutzen der Oberflächen-

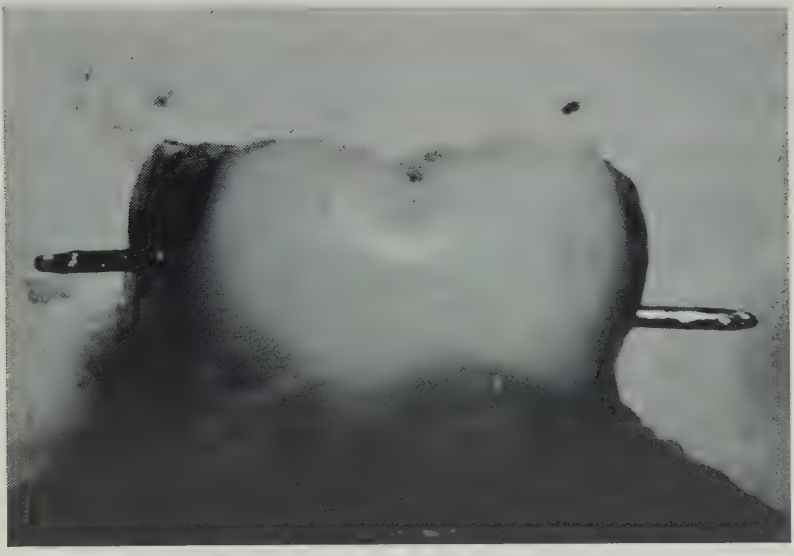


Abb. 14: Zahn Nr.3 mit Amalgamfüllung Nr.30, in die approximal 2 Stahldrähte von 0,5 mm ϕ eingelassen sind; die Drahtenden sind angespitzt.

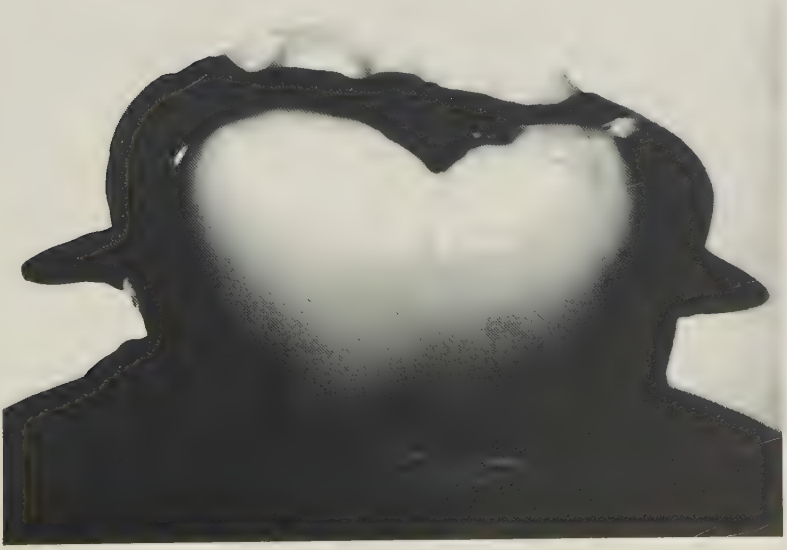


Abb. 15: Zahn Nr.4 mit eingegliedertem Inlay Nr.21 aus Palliag; die approximalen Spitzen sind modelliert und ausgearbeitet.

spannung des Wachses kann man in mehreren Schritten den Punkt zu einer Spitze verlängern.
Nach dem Gießen kann man - falls nötig - die Ausläufer (Abb. 15) noch weiter anspitzen.

- 3.1.3. Bewertung

Diese Gestaltung der Kontaktflächen der Wegaufnehmer **A,B** und die spitzen Ausläufer der Füllungen haben folgende Vorteile:

Die Aufbiegung ist unabhängig von der Parallelität der Approximalflächen

eine eventuell auftretende Rotation um die Z-Achse simuliert keine Aufbiegung, eher eine 'Schrumpfung' der Füllung

der Kontakt von der Füllung mit den Wegaufnehmern ist eindeutig definiert: je kleiner der Radius der spitzen Enden ist, desto eindeutiger bleibt der Kontaktpunkt berechenbar

damit wird die Reproduzierbarkeit der Messungen von diesem Meßverfahren ausreichend gewährleistet

die Herstellung der Approximalflächen ist von der Zeit her günstig und vertretbar

- 3.2. obere Wegaufnehmer **1,2,3**

Die drei Wegaufnehmer im Okklusalbereich sind ebenfalls geschlossene Systeme. Sie dienen normalerweise der Rauhigkeitsmessung. Als Meßfühler haben sie einen dünnen Stab mit einer senkrecht dazu, am Ende dieses Stabes, sehr kleinen Spitze. Bei horizontaler Lage des Meßsytems ist ihr Meßweg vertikal. Dies erfordert jedoch einige Besonderheiten beim Ausrichten.

- 3.2.1. Ausrichten der Wegaufnehmer

Um nur die Z-Komponente an der Höckerebene zu messen, muß der Wegauf-

nehmer horizontal und parallel zur Grundebene der Halterung ausgerichtet sein. Dazu eignen sich kleine Libellen, die man auf dem Wegaufnehmer und auf der Grundplatte befestigt (Abb. 16).

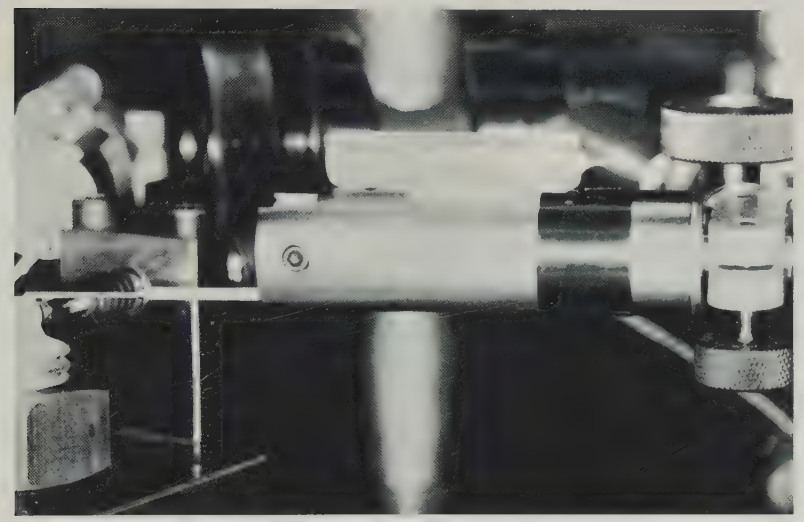


Abb. 16: ausgerichteter oberer Wegaufnehmer **2** mit Libelle; links die Halterung, im Hintergrund die Stativstange, an der dieser Wegaufnehmer befestigt ist.

Nachdem die Wegaufnehmer parallel zur Grundebene ausgerichtet sind, erfolgt noch eine visuelle Kontrolle, ob die Meßrichtung senkrecht zu der Grundebene verläuft. Dies kontrolliert man am besten durch Betrachtung der seitlich vom Meßstab am Gehäuse befindlichen Nuten. Wenn auch dieser Teil gut ausgerichtet ist, wird kontrolliert, ob der Wegaufnehmer in seinem günstigsten Meßabstand justiert ist. Ist dies der Fall, dann läßt sich der Zeiger des Meßinstruments Perthometer C3A in den Anzeigenbereich der großen Skala unter Zuhilfenahme eines Reglers bringen; ist dies nicht der Fall, dann muß der Wegaufnehmer entweder tiefer oder höher angebracht werden: danach muß auf jeden Fall der Wegaufnehmer neu ausgerichtet werden. Es zeigt sich sehr schnell, daß diese Schritte

sehr oft wiederholt werden müssen, bevor die eigentlichen Messungen durchgeführt werden können: der dafür große Zeitaufwand kann erst durch die Methode, die in 2.2.1.6.2. beschrieben wird, eingegrenzt werden.

- 3.2.2. Reproduzierbarkeit

Nach dem Ausrichten der oberen Wegaufnehmer (Abb. 17) ist die Reproduzierbarkeit so groß, daß der Fehler weniger als 2° beträgt, der dadurch bedingte Meßfehler unter 1 % liegt.

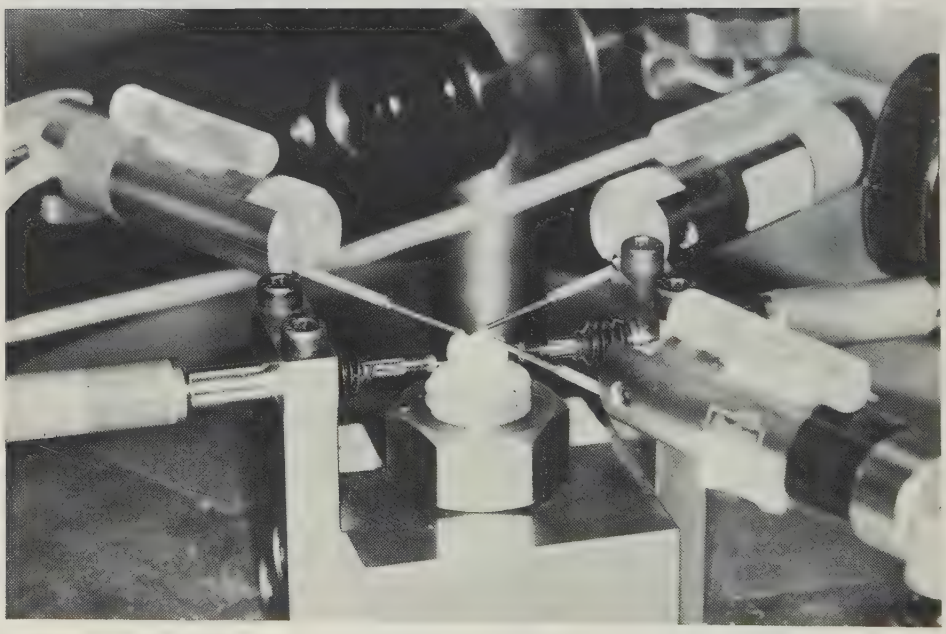


Abb. 17: Halterung auf der Grundplatte

Die seitlichen Wegaufnehmer sind mit ihren planen Einsätzen in Kontakt mit den Drahtspitzen, die in die Amalgamfüllung eingebettet sind.

Darüber obere Wegaufnehmer mit den Libellen und den Meßspitzen auf den Okklusalfläche.

- 3.3. Grundplatte

Um die drei oberen Wegaufnehmer in feste Beziehung zu dem in der Halterung befestigten Zahn zu bringen, wird eine 27,5 cm • 27,5 cm große und 2 cm dicke Aluminium-Platte mit verschiedenen Löchern versehen, um Stativstangen für die oberen Wegaufnehmer und um die Halterung zu befestigen.

- 3.3.1. Stativstangen

Messingstangen mit 25 mm ϕ werden in die Grundplatte eingeschraubt und dienen der Aufnahme von horizontalen Querstangen, mit denen die oberen Wegaufnehmer befestigt werden. Die Lage der Stativstangen ist so gewählt, daß es möglich ist, die gesamte Grundplatte mit allen Wegaufnehmern auf ein Meßmikroskop zu stellen, ohne daß dabei die eingestellte Position der Wegaufnehmer verändert wird.

- 3.3.2. Halterung

Diese wird mit 4 Schrauben von unten befestigt. Um die Halterung nicht übermäßig zu schwächen, sind die Gewindebohrungen von unten eingelassen. Aus räumlichen Gründen befindet sich die Halterung nicht genau im Zentrum der Grundplatte und ist um 45° zu den Außenkanten der Grundplatte gedreht, um das Ausmessen unter dem Meßmikroskop zu ermöglichen.

- 3.4. Befestigung in der Universalprüfmaschine

Die Grundplatte kann in der Universalprüfmaschine befestigt werden. Dazu sind 2 Löcher mit 16 mm ϕ vorgesehen, auf die Metallscheiben von 30 mm ϕ gelegt werden können, durch die Schrauben zur Befestigungsplatte an der Prüfmaschine geführt werden. Es hat sich gezeigt, daß die gesamte Versuchsanordnung bereits so stabil auf der Befestigungsplatte der Universalprüfmaschine liegt, daß ein zusätzliches Verschrauben keine nennenswerten

Vorteile, sondern wegen der beschränkten Zugangsmöglichkeit eher sogar Gefahren des Berührens der ausgerichteten und unter dem Mikroskop vermessenen Wegaufnehmer mit sich bringt. Bei der später verwendeten Prüfmaschine INSTRON 6025 (Kapitel 2.2.1.8.) ist eine Verankerung mit Hilfe von Spannwerkzeugen möglich, die ebenso effektiv ist. Man sollte beachten, daß eventuelle horizontale Kräfte, die eine Drehung um die Z-Achse entstehen lassen können, im Hinblick auf eine Vergrößerung der Meßungenauigkeit vermieden werden sollten. Nur bei wenigen Versuchen wurde die Versuchsanordnung fest an der Prüfmaschine befestigt.

- 3.5. Versuchsvorbereitungen für die Versuchszähne:

Bevor man überhaupt Messungen mit den oberen Wegaufnehmern machen kann, müssen diese erst eine gemeinsame 'Höckerebene' zur Verfügung haben. Darunter ist eine Ebene zu verstehen, die durch die ursprünglichen Höcker verläuft.

- 3.5.1. Höckerebene polieren und ausrichten

Die Verarbeitungsschritte zum Erzielen einer planen Höckerebene sind folgende:

- Höcker senkrecht zur Zahnachse mit Sandpapier unter Wasser soweit kürzen, daß zumindest 3 Flächen von je 2 - 3 mm^2 entstehen, ohne bereits die Kavitätenränder zu berühren.
- Zahn in Haltevorrichtung der Hochglanzpoliermaschine mit Hilfe eines plastischen Materials einspannen.
- 1-2 Stunden Höckerebene polieren lassen, wobei Diamantpaste mit einer Korngröße unter 1 µm zur Anwendung kommt.
- optische Kontrolle der polierten Flächen: mindestens 3 Flächen müssen eine spiegelglatte Oberflächenbeschaffenheit aufweisen.

In den Abbildungen 18a und 19 sind die Zähne mit ihrer polierten Höcker-

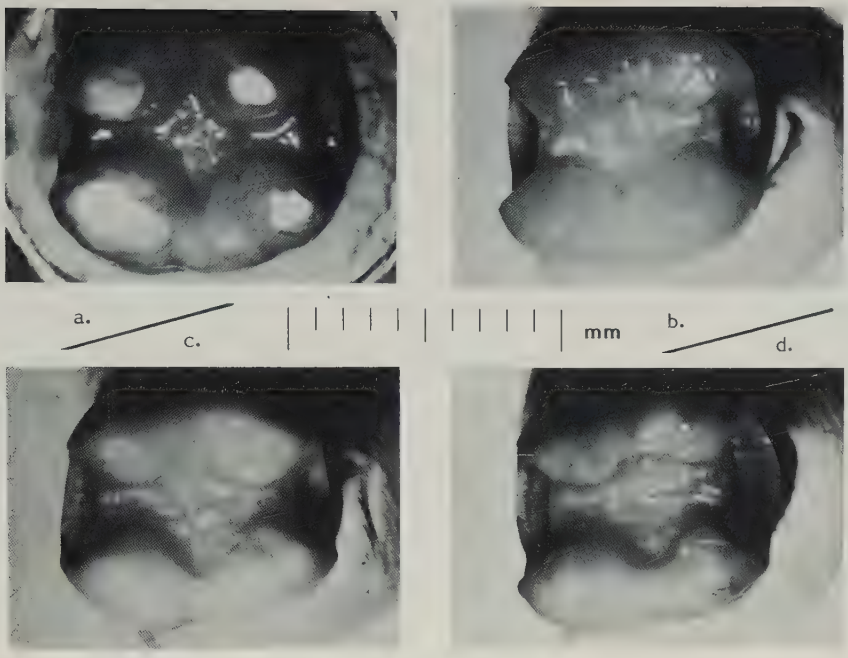


Abb. 18: a. Zahn Nr.1 mit polierter Höckerebene: von 5 Flächen weist eine eine rauhe Oberflächenstruktur (rechts unten) auf und nur 3 Flächen sind ausreichend groß, b. Zahn Nr.2, c. Zahn Nr.3, d. Zahn Nr.4

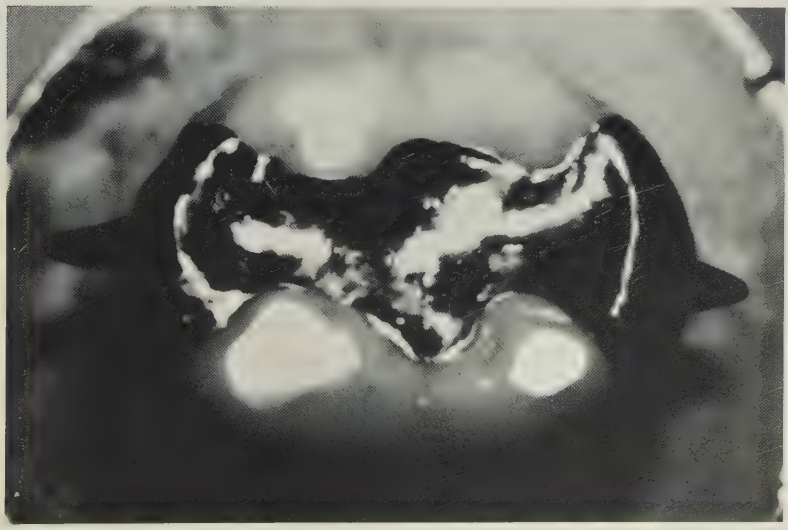


Abb. 19: Zahn Nr.4 mit Palliag-Inlay Nr.21; man sieht 3 spiegelglatte Flächen der Höckerebene und die spitz modellierten und ausgearbeiteten seitlichen Ausläufer.

ebene zu sehen; auffallend ist, daß zumindest 3 dieser Flächen perfekt eben sind, eine Fläche jedoch (Abb. 18a) eine dazu relativ rauhe Oberfläche besitzt. Die Ursache liegt wahrscheinlich in der Schmelzprismen-Struktur bzw. -Richtung. In Abbildung 15 und 14 sind die Zähne schräg von oben bzw. von der Seite zu sehen.

Der Zahn mit der hochglanzpolierten Höckerebene wird mit Hilfe eines Paralleldrückers in die mit Hartgips gefüllte Bohrung im Gewindestück mittig eingebettet.

- 3.5.2. Messung an den Okklusalflächen der Versuchszähne

Um Kippungen der Höckerebene berechnen zu können, braucht man die Ausgangslage dieser Höckerebene. Dazu ist es notwendig, die X-,Y- und Z-Koordinaten von mindestens 3 Punkten dieser Ebene zu bestimmen. Da mit einem Meßmikroskop (mit einem Kreuztisch) nur Messungen von auf eine Ebene projizierten Punkten durchgeführt werden können, geschieht die Bestimmung der Ebenencharakteristika anhand von Messungen in 2 Ebenen:

in der XY-Ebene werden Randpunkte der Ebene aufgesucht und die X- und Y-Koordinaten notiert;

in der XZ-Ebene werden die gleichen Randpunkte aufgesucht: die zuvor gemessen X-Koordinaten dienen dabei als zusätzliche Hilfe beim Lokalisieren.

- Randpunkte der Ebene, die näher am Objektiv gelegen sind, kann man gut erkennen, wenn das Licht von oben kommt (EPI-Stellung am Meßmikroskop).
- Randpunkte, die weiter vom Objektiv entfernt sind, können nur erkannt werden, wenn das Licht von unten kommt (DIA-Stellung): nach einiger Übung findet man diese Ebenenpunkte sehr gut wieder, der Fehler zwischen mehreren Messungen der Z-Koordinaten blieb unter 0,01 mm.

- 3.6. Erfassung der räumlichen Anordnung der Wegaufnehmer

Es werden die Koordinaten der Berührungspunkte der Wegaufnehmer **A**, **B**, **1**, **2** und **3** mit dem Zahn bzw. der Füllung vor den Versuchen jeder neu eingegliederten Füllung bestimmt. Da dies nicht in einer Ebene möglich ist, erfolgen Messungen in drei Ebenen: in XY-, XZ- und bei gedrehter XY-Ebene:

1. Es werden an der Halterung folgende Koordinaten in der XY-Ebene bestimmt:

    4 Punkte einer ersten Referenzlinie, die parallel zur X-Achse verläuft.

    Spitzen der Füllung ≙ Punkte **A** und **B**.

    5 Punkte am Rand des Gewindestücks.

2. An der Halterung werden folgende Koordinaten in der XZ-Ebene bestimmt:

    4 Punkte einer zweiten Referenzlinie, die parallel zur X-Achse verläuft.

    Spitzen der Füllung ≙ Punkte **A** und **B**.

3. An der Versuchsaufstellung, bestehend aus Grundplatte und Halterung, werden die XY-Koordinaten bestimmt (Abb. 20):

    Spitzen der Füllung, die mit den Wegaufnehmern **A** und **B** in Kontakt stehen.

    Berührungspunkte zwischen Wegaufnehmern **1**, **2** und **3** und der Höckerebene des Zahnes.

4. An einem Diapositiv, das von jeder Füllung unter einem Stereomikroskop gemacht wird, bestimmt man den Winkel zwischen Längsachse der Füllung und der Verbindungslinie **A-B** mit Hilfe einer Meßlupe mit eingebautem Winkelmesser. Aus den XY-Koordinaten von **A** und **B** wird der Winkel der Längsachse zur X-Achse berechnet.

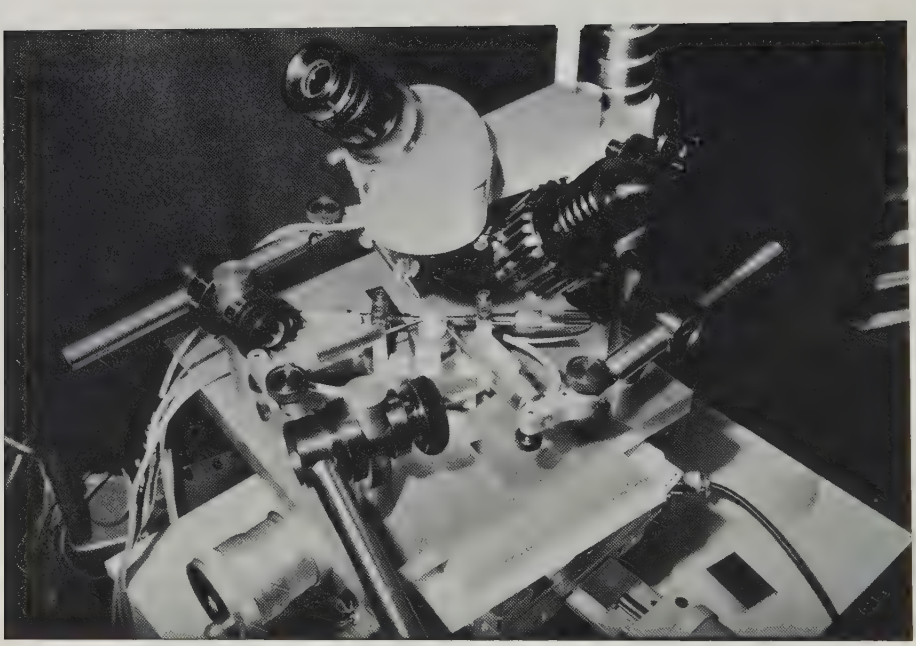


Abb. 20: Vermessung der XY-Koordinaten aller Berührungspunkte der Wegaufnehmer mit dem Zahn bzw. der Füllung unter dem Meßmikroskop

- 3.7. Berechnung der räumlichen Anordnung

Ziel dieser Berechnungen ist es, Koordinaten zu erhalten, die sich auf das ursprüngliche Koordinatensystem beziehen. Aufgrund der Abmessungen der Halterung ergibt sich für die Lage der Achsen:

X-Achse: ist 30 mm von der ersten Referenzlinie entfernt; der Abstand zur zweiten Referenzlinie beträgt 25 mm.

Y-Achse: senkrecht zur ersten Referenzlinie; der Ursprung (0/0/0) liegt im Mittelpunkt des Gewindestücks.

Z-Achse: steht senkrecht zur zweiten Referenzlinie und geht durch den Mittelpunkt (Achse) des Gewindestücks.

Es sind folgende Berechnungen nacheinander durchzuführen:

- Lineare Regression der ersten Referenzlinie mit Angabe des Drehwinkels, um den alle gemessenen Punkte gedreht werden müssen
- Drehung um den errechneten Winkel, jedoch in entgegengesetzter Drehrichtung
- Mittelpunkt aus den Koordinaten der 5 (mindestens 3) Punkte auf dem Gewindestück.
- Translation aller Punkte, so daß dem Mittelpunkt die Koordinaten (0/0/Z) zugeordnet werden.
- Lineare Regression der zweiten Referenzlinie mit Angabe des Drehwinkels
- Drehung aller Punkte in entgegengesetzter Drehrichtung
- Translation in X-Richtung, so daß die X-Koordinaten der Punkte **A** und **B**, die bei 2. gemessen sind, mit denen, die bei 1. gemessen sind, identisch sind.
- Nochmals Regression der korrigierten zweiten Referenzlinie mit Erfassen des Abstandes zur Grundebene
- Translation aller Z-Koordinaten bei Verwendung des vorigen Ergebnisses und des bekannten Abstandes von 25 mm der Grundebene zu den Mitten der seitlichen Wegaufnehmerflächen **A,B** .

Bis hier sind die X-, Y- und Z-Koordinaten von **A** und **B** im ursprünglichen Koordinatensystem berechnet.

- Berechnung des Drehwinkels anhand der Koordinaten von **A,B** bei Messung unter 3. gegenüber den zuvor berechneten X- und Y--Koordinaten.
- Drehung aller unter 3. gemessenen Punkte um den errechneten Drehwinkel in entgegengesetztem Drehsinn.
- Berechnung der Z-Koordinaten der Punkte **1**, **2** und **3** anhand der

Charakteristika der Höckerebene (Neigungswinkel zu X- und Y-Achse, Schnittpunkt mit der Z-Achse).

Damit hat man nun alle X-, Y- und Z-Koordinaten der Punkte **A, B, 1, 2** und **3** berechnet.

- 3.8. Größenordnung der Wegänderung und der Kippung

Bei Einwirkung einer Kraft von 500 N und Fehlen eines Trennmittels zwischen Zahn und Gewindestück traten

- bei zentraler Belastung 4-5 µm Translation in entgegengesetzter Z-Richtung und keine Kippung auf,
- bei exzentrischer Belastung je nach Wegaufnehmer 1-9 µm Wegänderung, d.h. eine Translation in umgekehrter Z-Richtung von 5 µm und eine Kippung (bei Differenz der X-Koordinaten der Wegaufnehmer **1** und **2** von 5 mm) von 5,5 Winkelminuten auf, also ungefähr 1/10 Grad.

Dies ergab bei den Meßwerten eine Differenz zwischen den Aufbiegungen mit und ohne Korrektur von 1-2 µm. Dennoch sollte die Korrektur der Meßwerte bei den Versuchen immer mit vorgenommen werden, um Fehler, die durch diese Kippungen bedingt werden, weitgehend auszuschalten.

- 4. Kraftmessungen:

Neben der Erzeugung einer Kraft besteht besonders der Wunsch, diese von der Größe her zu erfassen.

Die verwendete Universalprüfmaschine besitzt einen Wandler (Meßdose), der die Größe Kraft in elektrische Größen umsetzt. Es handelt sich dabei um Dehnungsmeßstreifen, die ihren elektrischen Widerstand bei Verformung ändern. Die einwirkende Kraft wird mechanisch erst in eine reversible Verformung umgesetzt, bevor man eine Widerstandsänderung feststellen kann. Die Dehnungsmeßstreifen sind mit einer elektronischen Schaltung verbunden, die eine Spannung in Abhängigkeit von der Widerstandsänderung erzeugt.

- 4.1. Aufzeichnung auf dem Schreiber der Instron:

Die von der Elekronik erzeugte Spannung wird in Auslenkungen einer Schreibernadel umgesetzt. Es lassen sich Meßbereich, Nullpunkt und Schreiberdämpfung (um das Rauschen der Elektronik nicht zur Anzeige zu bringen) einstellen. Ferner kann man den Papiervorschub mit Hilfe von Zahnrädern regeln.

Nachteile dieser Lösung sind:

der unterschiedliche Papiervorschub und

die Benutzung verschiedener Meßstreifen

Der Papiervorschub ließ sich nicht genauso groß wählen wie der eines 6-Kanal-Schreibers. Es kann keine direkte Beziehung zwischen der Einwirkung der Kraft und der Auslenkung der Wegaufnehmer mit einem Blick erkannt werden.

Da bisher durch die 5 Wegaufnehmer **A,B,1,2,3** noch ein Kanal des Mehrkanalschreibers unbenutzt blieb, war es sinnvoll, die Aufzeichnung der Kraft auch auf demselben Schreiber vorzunehmen.

- 4.2. Aufzeichnung auf dem gleichen Mehrkanalschreiber, der für die Wegaufnehmer gebraucht wird:

- 4.2.1. Anpassungsschwierigkeiten

Bei der Prüfmaschine INSTRON TTBM ist kein Spannungsausgang zur Weiterverarbeitung der Kraftgröße vorgesehen.
Nach längerer Suche in den Schaltplänen und in der Maschine selbst, konnte eine zur Kraft proportionale Spannung an 2 leicht zugänglichen Klemmen abgegriffen werden.
Die Ausgangsspannung beträgt allerdings nur 0 - 9 mV. Die sehr hohe Ausgangsimpedanz und die darauf überlagerten Frequenzen vom Synchronmotor machten eine direkte Ansteuerung des 6-Kanal-Schreibers unmöglich.

- 4.2.2. Anforderungen an die Anpassung

Die Ausgangsspannung der Prüfmaschine sollte auf eine Spannung von 5 V verstärkt werden, d.h. ungefähr 560-fach.
Die bei 400 Hz liegende Frequenz des Synchronmotors (dies wurde mit Hilfe eines Oszillographen ermittelt) muß unterdrückt werden, ebenso sollten Brummspannungen herausgefiltert werden.

- 4.2.3. Aufbau des selbstentwickelten Vorverstärkers mit Filtern (**Vv&F**)

- - 1. Blockschaltbild mit Erläuterungen

Der Vorverstärker besteht aus 3 Verstärkungsstufen, die mit hochohmigen Operationsverstärkern aufgebaut werden, 2 Doppel-T Filtern, die ein Durchlassen der Frequenzen um 400 Hz und 50 Hz verhindern. Weiterhin ist der Massepunkt der Ankoppelung im Betriebsspannungsbereich von 9 V verschiebbar.

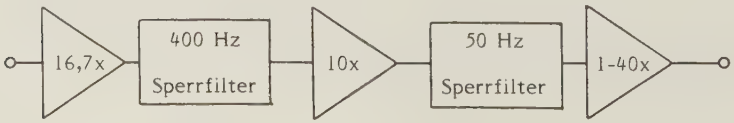


Abb. 21: Blockschaltbild des Vorverstärkers mit Filtern

- - 2. technische Daten des Vorverstärkers

- - 2.1. - allein

Eingangsspannung: 0 - 9 mV

Ausgangsspannung: 1 - 5 V

Spannungsverstärkung: 450-fach (regelbar bis 800-fach)

Eingangsimpedanz: größer als 1 MOhm

Ausgangsimpedanz: 500 Ohm

400 Hz Dämpfung: - 74 dB (Leistungsabschwächung 1:25.100.000)

50 Hz Dämpfung: - 65 dB (Leistungsabschwächung 1:3.200.000)

Die Spannungsverstärkung in Abhängigkeit zur Frequenz ist in Abb. 22 dargestellt. Bei dieser Darstellung ist die Gleichspannungsverstärkung mit 0 dB angedeutet.

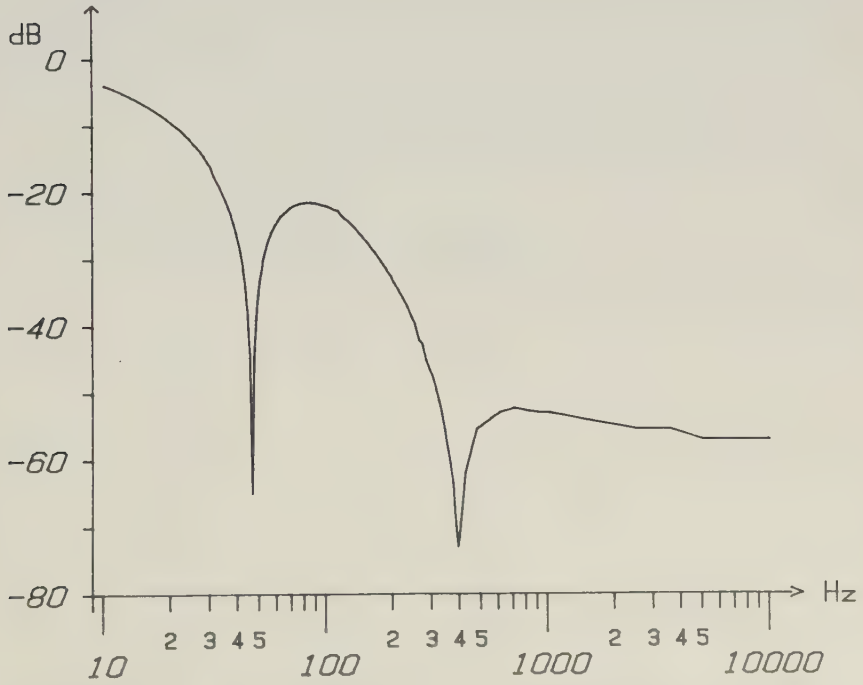


Abb. 22: relative Spannungsverstärkung des Vorverstärkers mit Filtern (Gleichspannungsverstärkung ≙ 0 dB).

Eine Absenkung um je 20 dB bedeutet eine Leistungsabschwächung von 1:100 und eine Spannungsverringerung von 1:10.

- - 2.2. - zusammen mit der Instron

Der **Vv&F** kommt seiner Aufgabe gut nach, jedoch machen sich von Zeit zu Zeit leichte Spannungsschwankungen bemerkbar, die bereits beim unverstärkten Signal vorliegen. Sie können das Meßergebnis maximal bis zu 10 % des Meßbereiches verfälschen, kommen allerdings in einem solchen Ausmaß seltener vor; übliche Fehler liegen im Bereich von 3 bis 5 % .

- 4.3. Meßergebnisse bei Aufzeichnung der Kraft nach (2.2.1.)4.2.

- 4.3.1. Untersuchung von Amalgam

Bei diesen Vorversuchen wurden noch zum Teil Kräfte bis 500 N angewandt. Als Zahn wurde ein Kunststoffzahn (Frasaco) benutzt. Die Präparation ist die für ein Inlay, also ohne Retentionen. Aus nachstehender Tabelle kann man die zunehmende plastische Verformung erkennen. Die Amalgamfüllung war 72 Stunden alt vor dem ersten Versuch.

	Belastung	dynamische Aufbiegung	Belastungs-punkt	bleibende Aufbiegung
1.	196 N	1,3 µm	Z	0 µm
2.	461 N	4,5 µm	Z	0 µm
3.	490 N	5 µm	Z	0 µm
4.	343 N	4 µm	A	0,7 µm
5.	348 N	4 µm	A	1,5 µm
6.	348 N	4,5 µm	A	2 µm
7.	343 N	15 µm	B	11 µm
8.	353 N	20 µm	B	16 µm
9.	353 N	26 µm	B	21 µm
10.	421 N	Bruch	B	---

Tab. 3: Aufbiegung einer Amalgamfüllung

- 4.3.2. Untersuchung von Composit

Belastungen einer Compositfüllung (Adaptic) brachte dynamische Aufbiegungen von bis zu 25 µm mit einer bleibenden Verformung von 12 µm. Die Versuche wurden in derselben Kavität des Frasaco-Zahnes von - 4.3.1. ausgeführt.

Alle Angaben der Aufbiegungen verstehen sich zusammengerechnet für beide Seiten, eine Unterscheidung je Seite kann nicht gemacht werden.

- 5. Abspeicherung aller Messungen und Versuche

- 5.1. Notwendigkeit

Die Korrektur der Meßwerte benötigt einen recht hohen zeitlichen Aufwand. Da bei dieser Untersuchung möglichst viele Meßwerte erfaßt werden sollen, um durchgehende Kurvenzüge zu erhalten, gelingt es nicht, die korrigierten Aufbiegungen aufzeichnen zu können.

Folgende Vorteile der vorgesehenen Meßanordnung sind zu nennen:

Genauigkeit: Die Ablesegenauigkeit der Meßinstrumente spielt keine Rolle

Unbestechlichkeit durch die Meßperson

abspeicherbar

abrufbar: sogar Monate danach

neue Berechnungen mit "alten" Meßdaten sind jederzeit möglich

simulieren eines Versuches ist denkbar

Resultate können direkt von einem Plotter gezeichnet werden

große Zeitersparnis an eintöniger Routinearbeit

alle Parameter, wie Meßgeräte-Einstellungen usw. sind abspeicherbar

Meßfehler, die durch Kippungen verursacht werden, können berechnet und eliminiert werden

Demgegenüber sollte der folgende Nachteil nicht außer Acht gelassen werden:

Die Entwicklung der technischen Geräte, sowie die Erstellung geeigneter und fehlerfreier Programme, die mehrfach getestet sein müssen, bevor man zu den Hauptversuchen übergehen kann, kostet einige Monate intensiver Arbeit. Dies hat sich später überaus deutlich bestätigt.

- 5.2. benötigte Mittel

Alle Datenquellen - Wegaufnehmer und Prüfmaschine - geben ihre Meßwerte in Form von unterschiedlichen Spannungen, also analog, zur weiteren Verarbeitung/Anzeige weiter. Diese Form kann ein Computer nicht verarbeiten, da er ausschließlich digital arbeitet (er kennt nur 2 Spannungszustände). Aus diesem Grunde braucht man also einen Analog-Digital-Wandler, der die analogen Spannungen in digitale Information (Zahlen) umwandelt und diese über eine Schnittstelle an einen Computer weitergibt. Die Schnittstelle muß ein Ansteuern des Analog-Digital-Wandlers ermöglichen ebenso wie die eigentliche Datenübertragung von Analog-Digital-Wandler zum Rechner.

- 5.2.1. Computer HP-85A

Als Rechner ist der Hewlett Packard Rechner HP-85A verwendet worden. Als Programmiersprache verfügt er über HP-Basic. Als Schnittstelle ist der HP-Interface-Bus (IEEE 488) zu nennen, der bei diesem Rechner eine Datenübertragung von bis zu 20 kByte/s gestattet.

- 5.2.2. Analog-Digital-Wandler

Unter verschiedenen Analog-Digital-Wandlern fiel die Entscheidung auf den von dem Ingenieurbüro Karstaedt entwickelten Analog-Digital-Wandler **ADM 08**, der im weiteren Text in Fettschrift abgekürzt wird. Er verfügt über die geforderte HPIB-Schnittstelle.

- - 1. technische Daten

Nachstehend ist ein Auszug der technischen Daten des **ADM 08** nach Unterlagen der Firma Karstaedt aufgeführt:

8 Differenzeingänge

12 Bit-Auflösung

IEC-Bus Schnittstelle (HPIB) (Talker und Listener)

Sample & Hold-Glied (Signalerfassungszeit kürzer als 5 µs)

AD-Wandlungsdauer beträgt 100 µs (12 Bit)

3 programmierbare Triggerarten zur Steuerung des Meßzeitpunktes:

1. externe Triggerung (bei ansteigender Flanke)
2. Device-Trigger-Befehl (über HPIB)
3. fortlaufendes Messen

Der Meßbereich ist von -5 V bis +5 V gewählt, der kleinste zu unterscheidende Spannungssprung beträgt 2,5 mV. Abbildung 23 zeigt das Blockschaltbild des **ADM 08.**

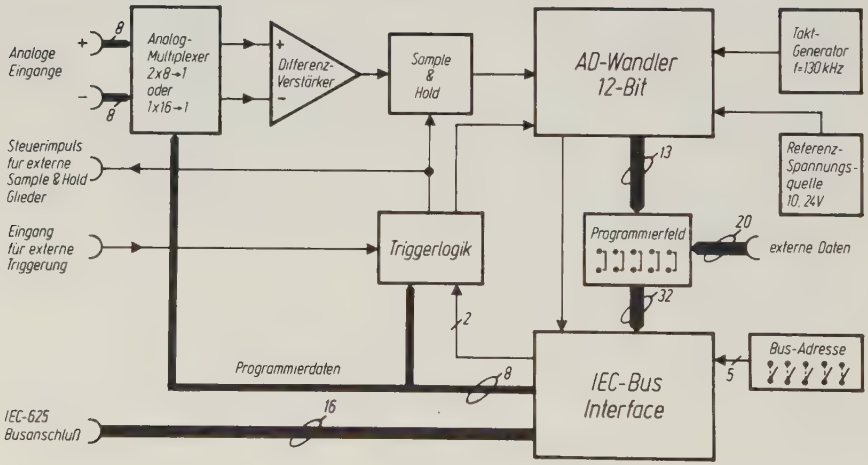


Abb. 23: Blockschaltbild des Analog-Digital-Wandlers **ADM 08**
(aus der Bedienungsanleitung der Fa. Karstaedt)

- - 2. Abtastgeschwindigkeit bei Steuerung durch den Computer HP-85A

Um die Spannungen der verschiedenen Kanäle in digitale Information umzuwandeln, müssen die Kanäle umgeschaltet werden. Dies erfordert eine Anweisung vom Rechner aus, zusätzlich muß noch der Trigger vom Rechner

aus gesetzt werden. Danach kann erst der gewandelte Meßwert eingelesen werden. Es können auf diese Weise nur ungefähr 12-14 Meßwerte je Sekunde eingelesen werden. Dies bedeutet bei einer Versuchsdauer von 15-40 s, daß nur 30-80 Meßwerte je Kanal zur Verfügung stehen. Die Auslenkungen der Wegaufnehmer werden z.B. zum Zeitpunkt des Kraftmaximums mit dieser Methode mit Sicherheit nicht erfaßt; außerdem sind die Meßwerte der verschiedenen Datenquellen zu so unterschiedlichen Zeiten aufgenommen (bis zu 0,5 s), daß die Ergebnisse sehr zweifelhaft wären. Folglich ist die Ansteuerung und Kanalumschaltung über die Programmiersprache Basic nicht möglich. Leider stand kein Assembler für den HP-85A zur Verfügung, so daß ein anderer Weg gesucht werden mußte.

- - 3. mögliche Einlesegeschwindigkeit mit HP-85A

Spart man sich die Kanalumschaltung, so kann man bedeutend mehr Meßwerte je Sekunde einlesen. Ein speziell vom Verfasser entwickeltes Testgerät überprüfte die maximal, fehlerfreie externe Triggergeschwindigkeit des **ADM 08** in Verbindung mit dem HP-85A. Es konnte über 1400 Trigger/s erfolgreiche Meßwertwandlungen einleiten. Der HP-85A mußte zu diesem Zweck im Fast-Hand-Shake-Betrieb (FHS) arbeiten; dieser ist im Basic vorgesehen. Beim FHS-Betrieb ist der Rechner vollkommen mit der Dateneinlese beschäftigt; ein Abbruch dieser Betriebsart geschieht erst, wenn der zugeordnete Daten-pufferspeicher (BUFFER) voll ist; sonstige Abbruchmöglichkeiten gibt es nicht.

- - 4. Geschwindigkeitsschwierigkeiten und deren Lösungen

Wie aus dem zuvor besprochenen ersichtlich ist, reicht die Meßwerteinlesegeschwindigkeit vom Basic vollkommen aus, wenn nur ein Kanal abgefragt wird. Demzufolge müßte man ein Gerät vorschalten, das die 6 benötigten Kanäle auf einen einzigen Kanal nacheinander umschaltet und nach jeder

Umschaltung dem **ADM 08** einen entsprechenden Trigger gibt. Dies wird durch eine weitere Konstruktion vom Verfasser vorgenommen.

- 5.3. Impedanzwandler & Multiplexer (**I&M**) (Abb. 24 und 25)

- 5.3.1. Aufgaben

Impedanzwandlung

Da neben der Datenerfassung mittels Computer auch noch der 6-Kanal--Schreiber zur sofortigen Kontrolle mitlaufen sollte und die Ausgangsimpedanz der Meßgeräte mit ungefähr 20 kOhm angegeben wird, ist eine Herabsetzung der Ausgangsimpedanz wünschenswert.

Kanalumschaltung = Multiplexer-Funktion

Von den maximal 8 Eingangskanälen soll einer der Kanäle auf den gemeinsamen Ausgangskanal geschaltet werden.

Generierung des externen Triggers für **ADM 08**

Nach der Umschaltung soll ein Trigger gesetzt werden. Dabei ist zu beachten, daß die Kanalumschaltung mit anschließender Triggerung nach Wandlung der Kanäle 1, 2, 3, 4 und 5 (seitliche und obere Wegaufnehmer) möglichst schnell erfolgen sollte, nach Wandlung von Kanal 6 (Prüfmaschine) aber eine kleine Pause gemacht werden sollte. Diese Pause hat die verbleibende zeitliche Länge, die zwischen zwei Meßwertgruppen liegen sollte, d.h. z.B. 50 ms: damit erhält man 20 Meßwertgruppen (=20 • 6 Meßwerte) in der Sekunde. Die Meßwerte einer Meßwertgruppe kommen bei dieser Lösung nahezu gleichzeitig in den Rechner HP-85A.

Anzeige der Nummer der Meßwertgruppe (Meßwerte von Wegaufnehmer A,B,1,2,3 und Prüfmaschine), deren Meßwerte gerade vom **ADM 08** gewandelt werden.

Aufbereitung des HPIB-Signals für erfolgte Datenübergabe von **ADM 08**

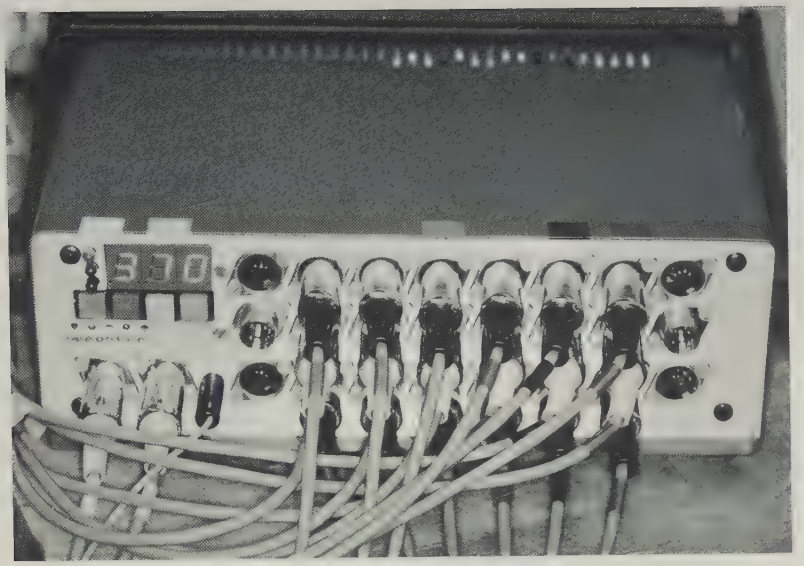


Abb. 24: Impedanzwandler & Multiplexer (**I&M**) mit Zuleitungen

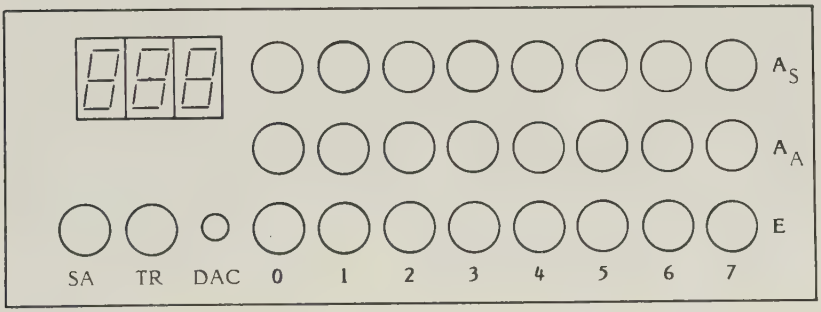


Abb. 25: Frontplatte vom Impedanzwandler & Multiplexer (**I&M**)

E : Eingänge 0-7

$\mathbf{A}_A$: Ausgänge für AD-Wandler

$\mathbf{A}_S$: Ausgänge für Schreiber

SA : Sammelausgang

TR : Triggerausgang

DAC: DATA ACCEPTED-Leitung vom HP-Interface-Bus

zum HP-85A. Da dieses Signal (DAC=Data Accepted) von sehr kurzer Dauer ist, wird es zur weiteren Verarbeitung durch einen zweiten Rechner auf 3 µs verlängert.

- 5.3.2. Schaltplan (Abb. 26)

Bei der Entwicklung des Gerätes kommen verschiedene Lösungen in Betracht:

1. reine Hardware-Lösung mit Integrierten Schaltungen
2. Hardware zusammen mit einem Mikroprozessor, wobei das Programm in einem Festwertspeicher (PROM oder EPROM) untergebracht ist. An eine Schnittstelle zur Kommunikation mit einem Computer wäre zusätzlich zu denken.
3. Hardware, die mittels mehrerer Datenkanäle von einem Computer mit einer speziellen Ansteuereinheit verbunden ist.

Die 1. Möglichkeit schied mangels Flexibilität, die 2. wegen des recht hohen Aufwandes und der schwierigen Programmentwicklung und -überprüfung bei einem fremden Mikroprozessor aus; der zeitliche Aufwand war nicht abzusehen.

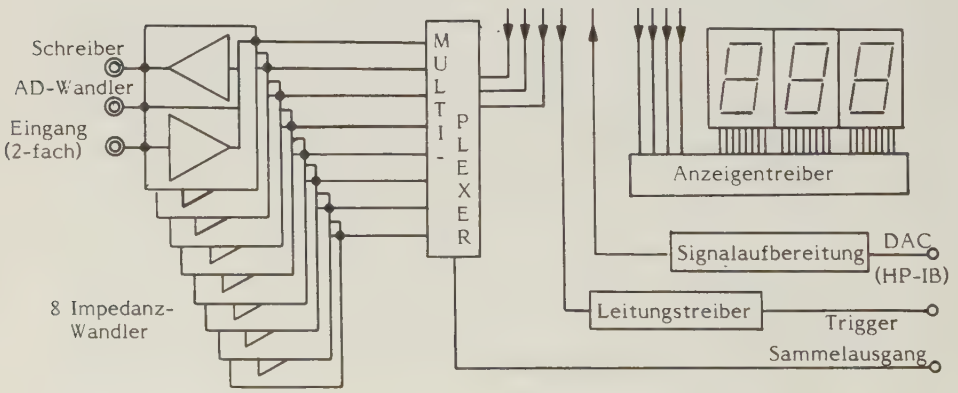


Abb. 26: Blockschaltbild des Impedanzwandlers & Multiplexer I&M

Übrig bleibt der 3. Lösungsweg, der zwar noch die Entwicklung einer Ansteuereinheit (**AE**) notwendig macht, aber sonst ein hohes Maß an Flexibilität zusichert. Die Programme können, da sie auf einem Computer laufen, gut getestet werden - sowohl im Einzelschritt- als auch im Echtzeit-Betrieb. Die Entscheidung fiel dabei auf den Pocket-Computer Sharp PC-1500A, der vom Verfasser in Maschinensprache/Assembler (Mikroprozessor LH5801) programmiert wurde, um von der Geschwindigkeit her keine Einschränkungen zuzulassen.

- 5.3.3. technische Daten

Anzahl der Eingänge:

8 Differenzeingänge

1 HPIB-Signaleingang von DAC (Data Accepted)

Anzahl der Ausgänge:

8 Differenzausgänge mit Nullabgleich

1 Sammeldifferenzausgang mit Nullabgleich

8 Differenzausgänge ohne Nullabgleich

1 digitaler Triggerausgang für **ADM 08**

Eingangsimpedanz: 10 MOhm

Ausgangsimpedanz: 430 Ohm

Eingangsspannungsbereich: -15 V bis +15 Volt

Ausgangsspannung: -11 V bis + 11 V maximal (ist zum Schutz von **ADM 08** begrenzt)

Einschwingzeit (99,9%): kleiner 12 µs (3 µs) bei 1 MOhm (100 kOhm) Ausgangsimpedanz der Datenquelle

Anschluß an **AE**: über 15-polige Leitung

- 5.4. Ansteuereinheit (**AE**) mit Computer Sharp PC-1500A

Die Ansteuereinheit stellt die Verbindung zwischen dem Computer Sharp

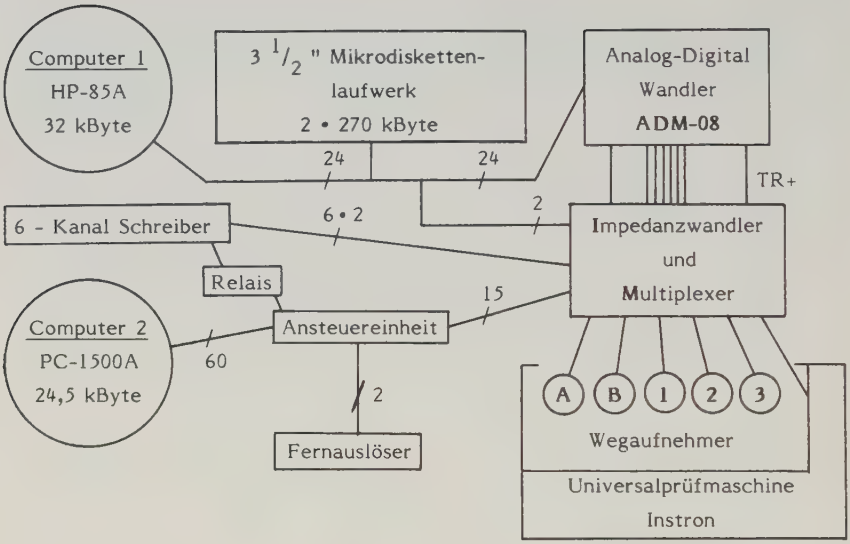


Abb. 27: Verdrahtungsschema zwischen allen bei den Versuchen verwendeten Geräten: die Zahlen neben den Querstrichen geben die Anzahl der Leitungen an.

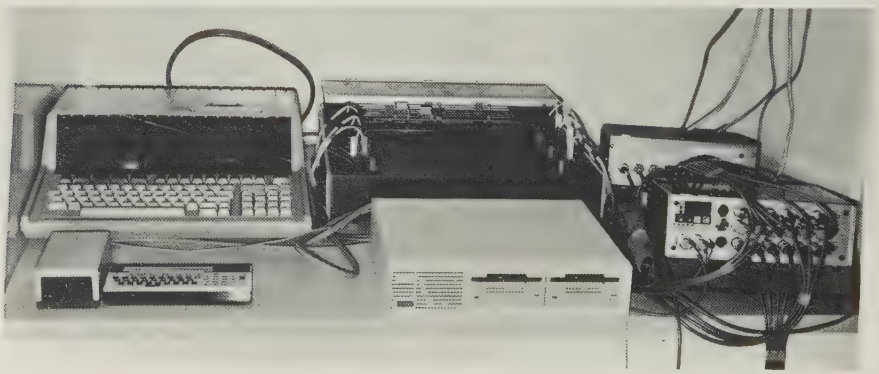


Abb. 28: Geräteaufbau zur Meßwerterfassung:
hinten: HP-85A, 6-Kanal-Schreiber, Analog-Digital-Wandler **ADM 08**
vorne: Ansteuereinheit (**AE**) an Sharp PC-1500A, $3\,^1/_2$"-Doppel-Diskettenlaufwerk, Impedanzwandler & Multiplexer (**I&M**)

PC-1500A und dem Impedanzwandler und Multiplexer dar. Bei der **AE** ist eine Fernbedienungsbuchse vorhanden, die den Gebrauch eines Fernauslösers gestattet, und ein Ausgang zur Steuerung eines Relais, das den Papiervorschub des 6-Kanal-Schreibers ein- und ausschaltet.
In der **AE** sind neben Leitungstreibern und Ausgängen für den **I&M** ein Quarzoszillator mit Frequenzteilern und programmierbaren Zählern, DIP--Schalter zum Einstellen der Zeit zwischen zwei Meßwertgruppen, RS-Flip--Flops und andere Bauteile enthalten.

- 5.5. Funktionsbeschreibung (Abb. 27 und 28)

Die Spannungsausgänge der Meßgeräte der seitlichen Wegaufnehmer **A,B,** der oberen Wegaufnehmer **1,2,3** und auch der Spannungsausgang der Prüfmaschine (nach vorangegangener Vorverstärkung) kommen auf die Eingänge 1 bis 6 von **I&M.** Dort werden sie 1:1 verstärkt auf den Analog-Digital--Wandler **ADM 08** und den 6-Kanal-Schreiber gegeben. Zusätzlich wird der hinter dem Multiplexer geschaltete Sammelausgang ebenfalls 1:1 verstärkt und auf Eingang 0 des **ADM 08** gelegt. Der gesamte Versuchsablauf wird durch den Sharp PC-1500A gesteuert, der auch den Fernauslöser abfragen kann. Mit Druck auf den Fernauslöser wird der Meßvorgang eingeleitet. Über die **AE** wird der gewünschte Kanal auf den Sammelausgang geschaltet. Nach einer kurzen Einschwingzeit wird von der **AE** ein Trigger gesetzt, der von Leitungstreibern im **I&M** an die externe Triggerung des **ADM 08** weitergeleitet wird. Nachdem der Spannungswert von der Sample & Hold-Schaltung übernommen wurde, kann bereits der nächste Kanal auf den Sammelausgang geschaltet werden. Der analoge Wert wird in digitale Information gewandelt, die anschließend sofort an den HP-85A weitergereicht wird. Der Rechner HP-85A bestätigt die erfolgte Datenübernahme mit der Leitung DAC (Data Accepted). Das Signal dieser Leitung wird von **I&M** aufbereitet an die **AE** weitergegeben: der Rechner Sharp PC-1500A

kann nun bereits den nächsten Trigger geben, falls dieses gewünscht wird. Wenn die sechs benutzten Kanäle nacheinander durchgeschaltet sind, wird der erneute Durchlauf erst wieder gestartet, wenn die an den programmierbaren Zählern (in der **AE**) eingestellte Zeit abgelaufen ist.

Ist der Versuch beendet, dann möchte man den HP-85A möglichst schnell weiter benutzen können. Da dieser jedoch solange blockiert ist bis der Datenpuffer (Buffer) voll ist, sollten weitere Meßwerte vom **ADM 08** an den HP-85A geleitet werden. Dabei spielt die Gültigkeit der Daten keine Rolle. Für diesen Fall kann man unmittelbar einen Trigger auf jede abgeschlossene Datenübergabe folgen lassen, ohne auf sonstige Ereignisse warten zu müssen, wodurch der HP-85A wenige Sekunden später dem Benutzer zur Verfügung steht.

Mit dem Fernauslöser hat man noch die Möglichkeit, besondere Ereignisse (z.B. Ende des Maschinenvorschubs usw.) zeitlich zu markieren. Der Zeitpunkt des Versuchsendes wird durch Umschalten auf die schnelle Triggerung vom Programm automatisch abgespeichert.

Nach dem Versuch kann man in den HP-85A noch Parameter eingeben, unter anderem auch die Länge des Versuchs, die mit den Meßdaten auf ein geeignetes Speichermedium abgelegt werden.

Der Papiervorschub des 6-Kanal-Schreibers wird von der **AE** über ein Relais ferngesteuert: dadurch werden die Aufzeichnungen nur während des Versuches vorgenommen.

- 5.6. Vorteile dieser Lösung

- nahezu gleichzeitige Meßwerterfassung einer Meßwertgruppe: innerhalb von 1 ms sind alle 6 Meßwerte gewandelt, sofern der HP-85A die Daten so schnell übernimmt
- große Flexibilität durch leichte Abänderung des Ansteuerprogramms
- Kontrolle des Datentransfers durch den Sharp PC-1500A, der über **AE**

und **I&M** sofort Trigger an den **ADM 08** schicken kann

- Zwischenspeicherung von Zeitpunkten besonderer Ereignisse

- 6. Programme zur Datenverarbeitung:

Für die Erfassung der Meßdaten sind Programme erforderlich. Die 3 Aufgabengebiete Eichung, Ausrichten der Wegaufnehmer und die Meßwerterfassung benötigen gleichzeitig die beiden Rechner HP-85A und Sharp PC-1500A, wobei die Programme des HP-85A in BASIC programmiert sind, die des Sharp PC-1500A in Maschinensprache (Assembler f. Mikroprozessor LH5801). Die besondere Schwierigkeit bei der Programmentwicklung liegt darin, daß die Programme nicht nur allein fehlerfrei laufen, sondern vollkommen aufeinander abgestimmt sein müssen: dies wird besonders an den Programmen für die Meßwerterfassung deutlich, da die Rechner sich gegenseitig auf ihre Verarbeitungsphasen kontrollieren. Weiterhin werden gleiche Daten--Files für die Programme zur Eichung und zur Meßwerterfassung benutzt.

- 6.1. Programm zur Eichung mit Abspeicherung der Konstanten

- 6.1.1. Eichvorgang

- - 1. Wegaufnehmer **A,B** für Aufbiegungsmessung

Diese Wegaufnehmer werden zum Eichen senkrecht in eine Halterung eingespannt. Mit 11 Endmaßen, die man zwischen Meßoberfläche der Wegaufnehmer und Grundfläche der Halterung schiebt, wird die Eichung vorgenommen: 1,00 mm; 1,01; 1,02; ... 1,10 mm. Ein Entfetten der Endmaße und aller in Betracht kommenden Flächen ist unbedingt nötig, um brauchbare Ergebnisse zu erhalten.

- - 2. Wegaufnehmer **1,2,3** für Lageveränderung des Zahnes

Ein Block aus gehärtetem Glas mit einer Meßrille von 9,1 µm $\pm$ 0,1 µm wird auf eine plane, glatte Oberfläche gelegt, die das Verschieben dieses Blocks gestattet. Die Wegaufnehmer werden parallel zur planen Oberfläche ausgerichtet. Durch Verschieben des Glasblocks kann man den Sprung

der Meßspitze in die Rille registrieren. Es erfordert allerdings einige Übung bis man gleichbleibende Eichergebnisse erzielt.

- - 3. Prüfmaschine

Die Eichung der Meßdose geschieht einerseits im unbelasteten Zustand und andererseits bei einer Belastung mit einem Gewicht mit der Masse von 20 kg.

- - 4. Einfluß durch sonstige Geräte

Da man die Eichung zusammen mit allen Geräten vornimmt, wird eine eventuelle, nicht mehr meßbare Abweichung der Spannungsverstärkung von 1:1 mit berücksichtigt.

- 6.1.2. Hilfestellung eines Programms

- - 1. Aufgaben des Programms

Dazu gehören:

Erfassen der Meßwerte

Errechnen von Mittelwert und Standardabweichung

Berechnung der linearen Regressionsgeraden (für **A,B**) mit dem Korrelationskoeffizienten

Abspeicherung auf Diskette von:

Umrechnungsfaktoren (6)

Nummer des zuletzt ausgeführten Versuchs (1)

Anzahl der Versuche bei einer der Füllungen (65)

- - 2. Bedienung

Der Bedienungsablauf sieht folgendermaßen aus:

1. Start der Programme von HP-85A und Sharp PC-1500A.

2. Auswahl des zu eichenden Gerätes am HP-85A mittels Funktionstasten.

3. Meßobjekte mit Wegaufnehmern bzw. Meßdose der Prüfmaschine in Kontakt bringen

4. Bei festzuhaltenden Meß-/Eichgrößen Fernauslöser betätigen.

5. Eichmaß eingeben in HP-85A (ist bei den Wegaufnehmern **1,2,3** vom Programm her bereits festgelegt)

6. eventuell nachträgliche Auswahl von 50 Meßwerten bestätigen oder abändern

7. Mittelwert, Standardabweichung, Minimum und Maximum der Meßwerte werden vom Thermodrucker ausgegeben.

8. Schritte 2 bis 7 mit weiteren Meßobjekten wiederholen.

9. Eichvorgang beenden

10. Umrechnungsfaktoren, Regressionsgerade und -koeffizient werden ausgedruckt.

11. Umrechnungsfaktoren auf Diskette abspeichern.

- 6.2. Programm zum Ausrichten der Wegaufnehmer in der Versuchsaufstellung

- 6.2.1. Vorgang des Ausrichtens

- - 1. Wegaufnehmer **A,B**

Zunächst werden die Wegaufnehmer in die Halterungen eingesetzt, ohne diese festzuschrauben. Die Zeiger der Meßinstrumente bringt man bei Kontaktlosigkeit gerade außerhalb des Meßbereiches. Durch Verschieben der Wegaufnehmer (zur Füllung hin) in den Bohrungen der Halterung bringt man die Zeiger der Meßinstrumente ungefähr in die Skalenmitte. Danach werden die Schrauben der Halterung mit einem Schlüssel angezogen. Falls die Anzeige mehr als 3 Skaleneinteilungen (von 10 möglichen) von der Mitte abweicht, wird der Vorgang wiederholt, anderenfalls werden die Zeiger elektrisch auf Skalenmitte eingeregelt.

- - 2. Wegaufnehmer 1,2,3

Die an den Stativstangen befestigten Wegaufnehmer sind während des Ausrichtens 3-dimensional beweglich.

Es sind folgende Schritte zu beachten, die - falls eine Änderung an einem der Punkte vorgenommen wird -, von Anfang an wiederholt oder überprüft werden müssen:

parallel zur Grundebene mit Hilfe von Libellen ausrichten

Nuten senkrecht zur Grundebene ausrichten

Meßspitzen auf hochglanzpolierte Fläche einstellen

Höhe des Wegaufnehmers so wählen, daß das Meßinstrument elektrisch abgleichbar ist

Es empfiehlt sich, den Zeiger auf den Wert von 20 µm einzustellen (Meßbereich: 0 - 100 µm), um während des Versuches nicht aus dem Meßbereich zu kommen.

- 6.2.2. Hilfestellung eines Programms

Es ist sehr zweckmäßig, um sich voll auf die mechanische Ausrichtung der Wegaufnehmer konzentrieren zu können, daß man sich den zusätzlichen Blick auf die Meßinstrumente erspart. Die Anzeigewerte stehen dem Analog-Digital-Wandler (**ADM 08**) an seinen Eingängen zur Verfügung und können programmgesteuert abgefragt werden. Die gewandelten Werte werden mit Sollwerten verglichen und entsprechend ihrer Abweichung akustisch hörbar gemacht.

- - 1. Aufgaben des Programms

Es sollen nicht nur 2 Zustände der Skalenwerte - über oder unter den Sollwerten - hörbar gemacht werden, sondern fein abgestuft werden. Da es in gewissen Grenzen möglich ist, den Ausgangspunkt der Meßgeräte der Wegaufnehmer abzugleichen, sollte angestrebt werden, die Wegaufnehmer

zumindest in den Einstellbereich der Abgleichregler zu bringen.

Als Frequenzen sind vorgesehen:

50 bis 200 Hz : Meßwert unterhalb des Regelbereiches

250 bis 800 Hz : Meßwerte im Regelbereich

1 kHz - 4 kHz : Meßwert oberhalb des Regelbereiches.

Ein Ton mit der Frequenz von 440 Hz bedeutet eine exakte Übereinstimmung von Soll- und Ist-Wert.

Um während der 5 Justierungen nicht den Rechner bedienen zu müssen, sollte der einzustellende Kanal mit Hilfe des Fernauslösers der Ansteuereinheit (**AE**) umgeschaltet werden können.

- - 2. Programm- und Registerbeschreibung

In einer 2-dimensionalen Matrix werden Sollwerte, untere und obere Grenzen der Regelbereiche abgelegt. Um ein Umschalten der Kanäle mittels Fernauslöser zu ermöglichen, wird die Zeit vor dem Meßvorgang abgespeichert. Der Sharp PC-1500A gibt in kurzen Zeitabständen (5 ms) Trigger an den **ADM 08**; falls jedoch der Fernauslöser gedrückt wird, kommt der Trigger mit 1 s Verzögerung. Nach der Messung vergleicht der HP-85A die momentane Zeit mit der zuvor gespeicherten: ist die für die Messung benötigte Zeitspanne größer als eine 1/4 s, so muß auf den nächsten Kanal umgeschaltet werden, ist sie kürzer, so wird der Meßwert mit dem entsprechenden Sollwert verglichen und entsprechend der Differenz ein Ton erzeugt.

- - 3. Bedienung

Zuerst wird das Programm des HP-85A gestartet; dieser gibt die Aufforderung, das dazugehörige Programm des Sharp PC-1500A zu starten und dieses dann dem HP-85A mitzuteilen. Damit werden die Meßwerte von Kanal 1 bereits hörbar gemacht. Zum nächsten Kanal kann man durch Druck auf den Fernauslöser weiterschalten.

Zum Beenden des Einstellvorganges unterbricht man zuerst die Programmausführung des HP-85A mit der PAUSE-Taste, dann die des PC-1500A mit der BREAK-Taste.

Die Bedienung ist vom Verfasser sehr einfach gestaltet, die Programme jedoch sind in ihren Details viel komplizierter.

- 6.3. Programm zur Meßwerterfassung mit Abspeicherung (Seite 188)

- 6.3.1. Datenmedium

Die zu erwartende Datenmenge wurde überschlagsmäßig so errechnet:

Ein Versuch dauert zwischen 20 und 35 s mit einem Durchschnittswert von ungefähr 25 s.

20 Meßwerte je Kanal sollen in einer Sekunde erfaßt werden:

$$25 \cdot 20 \cdot 6 = 3.000 \text{ Meßwerte.}$$

Jeder Meßwert benötigt zur Ablage 2 Byte: $3.000 \cdot 2 = 6.000$ Byte.

Geplant sind ungefähr 600 Versuche: $6.000 \cdot 600 = 3.600.000$ Byte.

Diese ursprünglich errechnete Datenmenge von 3,6 MByte soll nun abgespeichert werden mit den zu den Versuchen entsprechenden Parametern. Wie sich am Ende der Hauptversuche herausstellte, wäre ein zusätzlicher Korrekturfaktor von 3,75 noch hinzuzufügen gewesen.

- - 1. Cassetten als Speichermedium

Die Speicherkapazität einer Cassette beträgt 210 kByte. Es können maximal 42 Files (dies entspricht der Abspeicherung von 42 Versuchen) auf einer Cassette abgelegt werden. Nachteilig wirkt sich die Zugriffsgeschwindigkeit aus, die über 1 min betragen kann, wenn die File am Ende des Bandes abgelegt wird, da die Adresse der File mit dem Namen immer am Anfang des Bandes steht. Geht man von der überschlagsmäßig errechneten Datenmenge von 3,6 MByte aus, so benötigt man ungefähr 18 Cassetten, die bei Abnahme von 5 Stück bei 45 DM/Stk. liegen.

- - 2. Disketten als Speichermedium

Mit einem 3 1/2 Zoll Disketten-Laufwerk lassen sich je Diskette (einseitig) 270 kByte und maximal 112 Files abspeichern. Für 3,6 MByte benötigt man 14 Disketten, die man bei Abnahme von 10 Stück zu einem Preis von 14 DM/Stk. erhält (der Verfasser hat jedoch auf Hinblick auf spätere Wiederverwendbarkeit doppelseitige Disketten angeschafft, die 21 DM/Stk. kosten). Die Zugriffszeit ist im Vergleich zu den Cassetten gering. Die Disketten können auch von einem anderen Computer benutzt und gelesen werden. Das Lesen der Daten mit einem anderen Computer erfordert das Umgehen des Betriebssystems mittels kompilierter Unterprogramme. Der Verschleiß von Disketten ist viel geringer als der von Cassetten, was auch für die Datensicherheit von Bedeutung ist. Man kann außerdem leicht Kopien von ganzen Disketten machen, wenn man ein Doppellaufwerk zur Verfügung hat.

- 6.3.2. Aufgaben des Programms:

- Gesamtversuchsnummer zählen und auf der 'EICH'-File abspeichern
- Versuchsnummer der untersuchten Füllungen zählen und auf der 'EICH'-File ablegen
- Meßdaten erfassen
- Tag und Uhrzeit erfassen und mit den Daten der Versuche abspeichern
- Parameter nach dem Versuch erfragen
- Korrektur von Eingabefehlern sollte möglich sein
- vereinfachte Eingabe bleibender Parameter durch einfaches Bestätigen
- wiederkehrende Parameter automatisch dazufügen: Umrechnungsfaktoren, Versuchsnummer (gesamt und von der Füllung)
- Parameter auf Wunsch ausdrucken
- Anzahl der Meßdaten komprimieren mittels der zuvor erfragten Versuchs-

dauer (angegeben in Meßwertgruppen)

- Parameter, Uhrzeit und Meßdaten in einer File "MZ...." ablegen, wobei die Punkte durch die entsprechende Versuchsnummer zu ersetzen sind.
- Falls bei dem Gebrauch der Disketten Fehlermeldungen auftreten, sollten entsprechende Bedienungshinweise gegeben werden, z.B.:

  "Diskette ist voll, bitte neue Diskette einlegen"
- Datenabspeicherung vornehmen, falls man dies vor Beginn des nächsten Versuches vergessen hat.

Zunächst waren bei der Auslegung des Datenpuffers (Buffer) eine maximale Länge eines Versuchs mit 63 s veranschlagt worden; dieser Wert wurde, um jeden Versuch vollkommen von Anfang bis Ende erfassen zu können, auf 94,5 s gesteigert, was 1.890 Meßwertgruppen entspricht.

- 6.3.3. Belegung und Beschreibung der Parameter, die bei jeder Versuchsfile abgespeichert werden.

Daten-File Benutzung:

Die Abspeicherung der Meßwerte mit allen für die Berechnungen notwendigen Koordinaten und anderen Angaben, sowie die Meßwerte selbst werden vom Rechner HP-85A in Blöcken zu je 256 Byte auf den Disketten gespeichert beginnend mit Block 1 und endend mit Block **N1**.

Da in einen Datenblock eine Zeichenvariable (Stringvariable) mit maximal 253 Zeichen paßt, werden Parameter und Daten in Zeichenvariablen mit je 253 Zeichen (Bytes) untergebracht. Die Daten, die im Datenpuffer D$ (Buffer) enthalten sind, werden deshalb in kleine Einheiten (G$[2,253]) zerlegt und dann blockweise abgespeichert.

Katalog zu den abgespeicherten Daten

Position des 1. Byte innerhalb des Datenblocks		Anzahl Byte: ge-braucht	frei
Block 1:			
enthält Informationen über den Versuch, Koordinatenangaben, Umrechnungsfaktoren, Füllungs-Parameter und Parameter der Versuchsaufstellung:			
		0	256
Variable P$ einrichten		3	253
1	Nummer des Datenblocks in binärer Darstellung (hier Nr.1)	1	252
2	Anzahl der gespeicherten Datenblöcke (binär)	1	251
3	Versuchsnummer insgesamt (ASCII)	4	247
7	Datum: Tag, Monat, Jahr (ASCII)	3 • 2 = 6	241
13	Zeit: Stunde, Minute (ASCII)	2 • 2 = 4	237
17	Umrechnungsfaktoren der Meßwerte **A, B, 1, 2, 3** und **F** (Instron) von 1 Volt in µm bzw. kp (6 Zeichen ASCII)	6 • 6 = 36	201
53	Füllungsnummer (ASCII)	2	199
55	Material der Füllung (ASCII): 1=Degulor A 2=Degulor M 3=Palliag M 4=Amalgam (Amalcap) 5=Adaptic	1	198
56	Versuchsnummer bei dieser Füllung (ASCII)	3	195
59	Lage des Kontaktpunktes zwischen Druckstempel und Füllung (ASCII): A=nahe Punkt A, Z=zentral, B=nahe Punkt B	1	194
60	Ende der Abwärtsbewegung des Druckstempels (ASCII)	4	190
64	Beginn der Aufwärtsbewegung des Druckstempels	4	186
68	Ende eines Teilversuchs	4	182

Position des 1. Byte innerhalb des Datenblocks		Anzahl Byte: ge-braucht	frei
72	X-, Y- und Z-Koordinaten von **A** in mm (ASCII)	3•6= 18	164
90	X-, Y- und Z-Koordinaten von **B** in mm (ASCII)	3•6= 18	146
108	X-, Y- und Z-Koordinaten von **1** in mm (ASCII)	3•6= 18	128
126	X-, Y- und Z-Koordinaten von **2** in mm (ASCII)	3•6= 18	110
144	X-, Y- und Z-Koordinaten von **3** in mm (ASCII)	3•6= 18	92
162	Tangens vom Winkel zwischen Schnittgerade **Hx** (von Höckerebene und XZ-Ebene) und X-Achse	6	86
168	Tangens vom Winkel zwischen Schnittgerade **Hy** (von Höckerebene und YZ-Ebene) und Y-Achse	6	80
174	Schnittpunkt der Höckerebene mit der Z-Achse	6	74
180	Tangens des Winkels, den die Füllungsachse zur X-Achse, projiziert auf die XY-Ebene, bildet	6	68
188	Bemerkungen	68	0
Block 2 bis **N1:**		0	256
Variable G$ einrichten		3	253
1	Nummer des Datenblocks (Block 1 mitgerechnet)	1	252
12n-10	Meßwerte des Wegaufnehmers **A**	je 2	
12n- 8	Meßwerte des Wegaufnehmers **B**	je 2	
12n- 6	Meßwerte des Wegaufnehmers **1**	je 2	
12n- 4	Meßwerte des Wegaufnehmers **2**	je 2	
12n- 2	Meßwerte des Wegaufnehmers **3**	je 2	
12n	Meßwerte der Instron (**F**)	je 2	
Diese Angaben beziehen sich auf Werte von n=1 bis n=21.		252	0

Die mit 6 ASCII Zeichen abgespeicherten Werte bestehen aus dem Vorzeichen, 4 signifikanten Ziffern und dem stellenrichtigen Dezimalpunkt (amerikanische = rechnertypische Schreibweise anstelle von einem europäischem Dezimalkomma).

- 6.3.4. Bedienung

Die Vorgehensweise ist wie folgt:

1. Programm von HP-85A starten
2. Fragen, wie z.B. Datum und Uhrzeit beantworten
3. Rechner Sharp PC-1500A einschalten und RESET-Routine aufrufen: falls ein Ton hörbar ist, muß die Variable Z$ aufgerufen werden: in ihr ist die vorprogrammierte Zeit zwischen 2 Meßwertgruppen und eine mögliche Fehlerbeschreibung angegeben
4. HP-85A mit Funktionstaste auf Meßwerterfassung einstellen
5. Sharp PC-1500A: Routine für die Gesamtsteuerung des Versuchs aufrufen: diese Routine besteht aus der RESET-Routine (jetzt darf kein Ton hörbar sein, wenn alles in Ordnung ist), anschließend wird automatisch die Meßwerterfassungsroutine aufgerufen, die die Messung jedoch erst einleitet, wenn der Fernauslöser das erste Mal niedergedrückt wird
6. Fernauslöser betätigen und Prüfmaschine starten
7. zwischendurch können Meßwertgruppen mit Hilfe des Fernauslösers markiert werden (bis zu 100 Werte)
8. wenn der Versuch beendet ist, sollte der Fernauslöser betätigt werden, um die Nummer der letzten Meßwertgruppe zum Zwecke der Reduzierung überflüssiger Daten zu verwenden
9. BREAK-Taste am PC-1500A einmal betätigen: es erfolgt ein Sprung von der Meßwerterfassungsroutine in die Fast-Trigger-Routine: diese gibt so schnell wie möglich einen Trigger nach dem anderen, sobald die Meßwertübertragung zwischen **ADM 08** und HP-85A erfolgt ist; sobald der Pufferspeicher des HP-85A gefüllt ist, findet keine weitere Übertragung von Meßwerten statt: dies erkennt der PC-1500A und springt in die Anzeige-Routine

10. der HP-85A ist inzwischen aus seinem Fast-Handshake-Betrieb herausgegangen und fordert die Eingabe der Parameter
11. mit dem Fernauslöser können am **I&M** die markierten Meßwertgruppen zur Anzeige gebracht werden
12. nach Eingabe aller Parameter speichert man (mittels der Funktionstasten) den Versuch ab
13. BREAK-Taste des PC-1500A betätigen, um aus der Anzeigeroutine herauszukommen: danach befindet sich der Rechner im normalen Interpreter-Betrieb

Um weitere Versuche durchzuführen, beginnt man mit Schritt 4. Das Aufrufen der in Assembler/Maschinensprache geschriebenen Routinen erfolgt beim Sharp PC-1500A durch Betätigung der speziell belegten Funktionstasten.

- 7. Überprüfung des gesamten Versuchsaufbaus

Ein Testkörper, der nur aus einem 5 cm langen Gewindestück mit einer polierten planen Oberfläche besteht, dient zur Abschätzung der maximal mit dieser Versuchsaufstellung möglichen Kraftanstiegszeit bei der eingestellten Vorschubsgeschwindigkeit des Druckstempels von 0,5 mm/min und zur Angabe über Ausmaß der Kippungen bei exzentrischen Kraftangriffen.

Innerhalb von 4 - 6 Sekunden (je nach Prüfmaschine) kann eine Kraft von 200 N erreicht werden.

Die maximalen Kippungen um die Y-Achse betragen bei normalen exzentrischen Belastungen 40 Winkelsekunden bei 200 N, bei extrem exzentrischen Belastungen mit 250 N ist eine Kippung von 1,8 Winkelminuten registriert worden.

Die Kippungen um die X-Achse blieben unter 20 Winkelsekunden.

Translationen in Z-Richtung waren bis 10 µm festzustellen.

- 8. Abänderung der Versuchsanordnung auf neue Prüfmaschine

Noch bevor mit den Hauptversuchen begonnen werden konnte, wurde die alte Universalprüfmaschine INSTRON TTBM durch die INSTRON 6025 abgelöst. Letztere besteht aus folgenden Elementen:

Prüfrahmen mit Antrieb und Versorgungseinheit,

Konsole mit Bildschirm,

XY-Schreiber und

Matrixdrucker .

Die Konsole enthält außer den Bedienungselementen noch ein Diskettenlaufwerk, das das Abspeichern von Einstellungen für die Versuchsabläufe ermöglicht.

Abbildung 29 zeigt die neue Prüfmaschine zusammen mit der Versuchsaufstellung und den Meßgeräten der Wegaufnehmer.

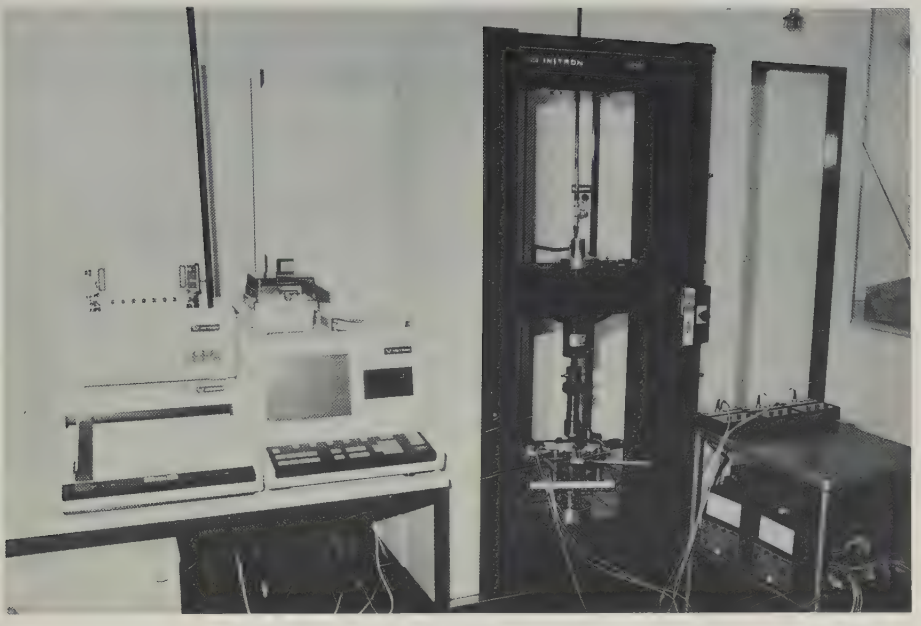


Abb. 29: Universalprüfmaschine INSTRON 6025 mit Versuchsaufstellung.
Links: Matrixdrucker und X-Y-Schreiber, daneben Konsole und Prüfrahmen mit Druckstempel und Versuchsaufstellung.
Rechts: oben auf dem Tisch die Zwischenschaltkästen der Wegaufnehmer **1,2,3** , darunter die Meßgeräte der Wegaufnehmer **A,B.**

- 8.1. Meßwertübertragung

Bei dieser Universalprüfmaschine INSTRON 6025 ist ein Spannungsausgang vorhanden, der potentialfrei Spannungen von -10 V bis 0 V ausgibt in einem vorgewählten Meßbereich, der bei diesen Versuchen auf 200 N eingestellt war. Da der Spannungsbereich des AD-Wandlers von -5 V bis +5 V reichte, mußte die Ausgangsspannung auf die Hälfte gebracht werden. Dazu dienten 2 Widerstände mit je 10 kOhm. Durch die anschließende Eichung ist eine Toleranzabweichung von den Widerstandswerten mit erfaßt.

- 8.2. Einrichten der INSTRON 6025 auf den Versuchsablauf

Die Maschine ist auf zyklischen Betrieb eingestellt worden, wobei nach einem Zyklus der Prüfvorgang abgebrochen wird.

Weitere Einstellungen sind:

Prüfgeschwindigkeit: 0,5 mm/min

Rücklaufgeschwindigkeit: 50 mm/min

Steuerung: zyklisch

max. Pegel: 200 N (dieser Wert ist variabel)

Aktion: zyklisch

min. Pegel: 0 N

Aktion: Stop

- 8.3. Bedienung

Der Druckstempel wird mit den Maschinenvorschubtasten (schnell und langsam) an die Füllung vorsichtig herangeführt. Ein leichter Kontakt des Druckstempels mit der Füllung kann durch die Prüfmaschine vorgenommen werden, indem man die Prüfkraft auf 1 N oder kleiner einstellt und auf die Starttaste drückt. Beim ersten Kontakt mit der Füllung entfernt sich gleich der Druckstempel bis die Füllung gerade noch berührt wird. Nun kann man die gewünschte Prüfkraft (70 N, 150 N, 200 N) einstellen und die Starttaste betätigen, wobei die Aufzeichnung der Wegaufnehmerauslenkungen und der Kraft gleich durch Druck auf den Fernauslöser mit gestartet wird. Nach Erreichen der eingestellten Kraft bewegt sich der Druckstempel von der Füllung weg. Sobald die Kraft bei 0 N liegt, stoppt die Prüfmaschine automatisch und der Versuch ist beendet.

2.2.2. Hauptversuche:

- 1. Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau ist bereits im Kapitel Vorversuche detailliert beschrieben. Er besteht im wesentlichen aus der Halterung, der Grundplatte mit den Stativstangen, den seitlichen Wegaufnehmern **A** und **B**, den oberen Wegaufnehmern **1**, **2** und **3**, die senkrecht zur Grundebene die Meßwege aufnehmen. Die Wegaufnehmer sind an Meßgeräte angeschlossen, die die Wegaufnehmer mit den nötigen Signalen und Spannungen versorgen, die Signale der Wegaufnehmer aufbereiten und diese sowohl zur Anzeige bringen als auch an einem Spannungsausgang weiteren Geräten zur Verfügung stellen. Die Prüfmaschine INSTRON 6025 erzeugt die für die Versuche notwendigen Kräfte mittels Vorschub (nach unten) eines Druckstempels. Die programmgesteuerte Prüfmaschine wird mit Hilfe mehrerer Menüseiten auf den gewünschten Versuchsablauf eingerichtet. Man erhält an einem der Ausgänge die zur Kraft proportionale Spannung, die (hier nach Zwischenschaltung eines 2:1 Spannungsteilers) weiter verarbeitet werden kann. Die 5 Ausgänge der Meßgeräte **A**, **B**, **1**, **2**, **3** und die 2:1 geteilte Ausgangsspannung der Prüfmaschine werden von einem (selbstgebauten) Impedanzwandler mit nachgeschaltetem Multiplexer (**I&M**) an den Analog-Digital-Wandler (**ADM 08**) und an einen 6-Kanal Schreiber zur sofortigen Kontrolle weitergeleitet.

Der **ADM 08** gibt die Daten über den HP-Interface-Bus an den Rechner HP-85A, der nach abgeschlossener Dateneingabe diese Meßwerte mit den Parametern auf eine Diskette abspeichert.

Wichtig für den Versuchsablauf ist der Rechner Sharp PC-1500A mit der selbstgebauten Ansteuereinheit (**AE**). Die Aufgaben von der AE reichen von Start der Meßdateneinlese nach Druck auf den Fernauslöser über Einschalten des Papiervorschubes des 6-Kanal Schreibers, Kanalumschaltung

beim selbstgebauten **I&M**, Generierung des Triggers für **ADM 08**, Erkennen der erfolgten Datenübergabe von letzterem zum HP-85A, Anzeige und Zwischenspeicherung von Nummern der Meßwertgruppen, Beendigung des Versuches mittels der BREAK-Taste, dem damit ferngesteuerten Stopp des Papiervorschubs bis zur Anzeige der zwischengespeicherten Nummern der Meßwertgruppen, die besondere Ereignisse und Ende eines Versuches markieren.

- 2. Eichen der Meßgeräte und der Prüfeinrichtung

Die Ausgänge der Wegaufnehmer und der INSTRON sind geeicht worden, die Eichfaktoren sind auf Diskette abgelegt worden (Näheres siehe unter Eichung im Kapitel 'Programme zur Datenverarbeitung' (2.2.1.6.)).
Der Eichvorgang ist vor den Versuchen mehrmals vorgenommen worden sowie nach allen Versuchen (siehe auch bei 'Fehlerbesprechung' (2.2.5.)).

- 3. Untersuchungen

Es werden 4 extrahierte Zähne mit insgesamt 27 Inlays und 4 Amalgamfüllungen untersucht. Für die Versuche sind ausschließlich untere Molaren verwendet worden, da die Fissurenform ziemlich geradlinig von mesial nach distal verläuft. Dies begünstigt eine Aufbiegung in mesio-distaler Richtung mehr, als es bei einem oberen Molaren der Fall wäre.
Die Molaren waren weitgehend kariesfrei; sie sind entweder aus parodontalen oder chirurgischen Gründen entfernt worden.
Um ein Austrocknen der Zähne zwischen den Versuchen zu verhindern, wurden sie in eine Lösung (Rezeptur von Prof. Newesely) eingelegt, die sich aus folgenden Bestandteilen zusammensetzt:

60 Teile Alkohol (95%)

15 Teile Glycerin

25 Teile destilliertes Wasser.

- 3.1. Auswahl der Füllungen

- 3.1.1. - Werkstoffe

Es werden 4 Füllungswerkstoffe untersucht:

Amalgam (Amalcap SAS (Non-Gamma 2))

Silber-Palladium-Legierung (Palliag M)

weiche Goldlegierung, Typ 1 (Degulor A)

harte Goldlegierung, Typ 4 (Degulor M)

- 3.1.2. - Kavitäten

Es werden 4 Kavitäten verwendet, von denen drei zierlich sind und eine von mittlerer Größe ist. Die Füllungen für die mittlere Kavität (Zahn 4) sind am Isthmus 2,5 mm breit und ungefähr 2 mm hoch, die Füllungen für die Kavitäten der Zähne 1, 2 und 3 sind am Isthmus 1,5 mm schmal und 2,0 mm bis 1,5 mm hoch (okklusal ist von der Dentinschicht nur wenig weggenommen).

- 3.2. Auswahl der Belastung

Bei den Vorversuchen sah man bei einer Belastung von 270 N bereits einen Bruch einer Amalgamfüllung bei exzentrischer Belastung. Deshalb wurden die maximalen exzentrischen Belastungen unterhalb der für die zentrische Belastung gewählt. Aufgrund der maximalen Kaukräfte von weniger als 180 N wurden 200 N für zentrische, 150 N für exzentrische Belastungen gewählt. Um auch Aufbiegungen bei physiologischen Kaukräften zu registrieren, erfolgten Belastungen mit maximalen Kräften von 70 N sowohl für die zentrischen als auch für die exzentrischen Belastungspunkte.

- 3.3. Reproduzierbarkeit der Versuchsaufstellung

Zahn 1 dient überwiegend zur Überprüfung der Reproduzierbarkeit der Versuchsaufstellung.

Zahn 1

Druckstempel bei:	A		Z		B		
max. Kraft von	70N	150N	70N	200N	70N	150N	gesamt
Palliag M							
Inlay 1	5	7	28*	31*	6	6	83
Inlay 1 ²	-	5	-	5	-	5	15
Inlay 2	5	6	22*	23*	5	5	66
Inlay 2 ²	-	5	-	5	-	5	15
Inlay 3	6	5	12*	8	5	5	41
Inlay 3 ²	-	5	-	5	-	5	15
Inlay 4	10	14	11	11	15	5	66
Inlay 4 ²	-	5	-	5	1	4	15
Inlay 5	5	6	5	6	5	6	33
Inlay 5 ²	-	5	-	5	-	5	15
Inlay 6	5	5	12	-	5	5	32
Inlay 6 ²	-	5	-	5	-	5	15
Inlay 7	6	5	10	16	7	7	51
Inlay 7 ²	-	5	-	5	1	4	15
Inlay 8 ²	6	11	11	11	9	10	58
Inlay 9	6	5	15	11	11	3	51
Inlay 9 ²	-	5	-	5	-	5	15
Inlay 10 ²	5	11	5	38	5	11*	75
Amalcap							
Füllung 28	5	5	10	10	5	5	40
							716

Tab. 4: Anzahl der Versuche mit Zahn 1

² kennzeichnet die Versuche, bei denen der Zahn 1 zum 2.Mal eingespannt ist.

Die mit * markierten Werte werden im Text besprochen.

Druckstempel bei	A		Z		B		
max. Kraft von	70N	150N	70N	200N	70N	150N	gesamt
Zahn 2							
Inlay 11 Palliag M	5	5	5	5	5	5	30
Inlay 12 Palliag M	5	5	5	5	5	5	30
Inlay 13 Palliag M	5	5	5	5	5	5	30
Inlay 14 Degulor M	5	5	15	5	5	5	40
Inlay 15 Degulor M	5	5	15	5	5	5	40
Inlay 16 Degulor M	5	5	15	5	5	5	40
Inlay 17 Degulor A	5	5	15	10 #	5	5	45
Inlay 18 Degulor A	5	5	15	10	5	5	45
Inlay 19 Degulor A	5	5	15	10	5	5	45
Füllung 29 Amalcap	5	5	5	10	5	5	35
Zahn 3							
Inlay 25 Palliag M	5	5	10	10	5	5	40
Inlay 26 Degulor M	5	5	15	10	5	5	45
Inlay 27 Degulor A	5	5	15	10	5	5	45
Füllung 30 Amalcap	5	5	5	10	5	5	35
Zahn 4							
Inlay 20 Palliag M	5	5	5	10	5	5	35
Inlay 21 Palliag M	5	5	5	10	5	5	35
Inlay 22 Palliag M	5	5	5	10	5	5	35
Inlay 23 Degulor M	4	6 #	15	10	5	5	45
Inlay 24 Degulor A	5	5	15	10	5	5	45
Füllung 31 Amalcap	5	5	7	9	5	5	36
							776

Tab. 5: Anzahl der Versuche mit Zähnen 2, 3, 4

Bei einem der Versuche ging die max. Kraft weit über 200 N

Die 10 hergestellten Palliag-Inlays wurden in 2 Güssen hergestellt, wobei die Inlays 1-6 in der 1.Muffe, die Inlays 7-10 in einer 2.Muffe eingebettet waren. Die Inlays aus demselben Material für die Zähne 2, 3 und 4 wurden in einem gemeinsamen Guß hergestellt. Somit lassen sich Unterschiede vom Guß her weitgehend ausschließen.

- 3.4. Messungen

Die Zähne 2, 3 und 4 sollen eventuell feststellbare Unterschiede der Füllungswerkstoffe aufzeigen. In den Tabellen 4 und 5 ist die Anzahl der Versuche mit den verschiedenen Zähnen und Füllungen aufgelistet, untergliedert nach Kraftangriffspunkten und Maximalkräften der Versuche. Bei den mit * versehenen Angaben ist folgendes dazuzufügen:

von den 28 unter 70 N eingruppierten Versuchen mit Inlay 1 kommen 4 Versuche auf ein Kraftmaximum von 50 N, 2 auf 80 N, 16 auf 70 N und 6 auf 100 N;

von den 31 unter 200 N eingruppierten Versuchen mit Inlay 1 kommen 8 auf 150 N und 23 auf 200 N;

bei den 22 Versuchen (70 N) mit Inlay 2 ist 1 Versuch mit 100 N Maximalkraft ausgeführt, die übrigen mit 70 N;

4 von den 23 unter 200 N eingruppierten Versuchen mit Inlay 2 sind mit 150 N ausgeführt;

2 der 12 Versuche (70 N) mit Inlay 3 hatten als Kraftmaximum 50 N.

5 Versuche sind nicht in den Tabellen 4 und 5 enthalten, da die Maximalkraft unter 10 N liegt, diese Versuche jedoch nicht zu den ersten Versuchen eines Inlays gehörten.

- 3.5 Belastungsspitzen bei den Hauptversuchen

Bei den Versuchen

575 , Inlay 10, Nr.56 , **B** , Palliag M,

981 , Inlay 17, Nr.41 , Z , Degulor A,

1177 , Inlay 22, Nr.32 , Z , Palliag M,

1195 , Inlay 23, Nr.15 , **A** , Degulor M

hat die Prüfmaschine aus nicht genauer zu klärender Ursache während der Versuche einen schnellen Maschinenvorschub gestartet, der zu einer Kraftspitze von weit mehr als 200 N führte.

Als mögliche Ursache kommen Spannungsspitzen im 220 V-Netz in Betracht, gegen die man sich nicht ohne weiteres schützen kann. Jedoch ist die Anzahl der unkontrollierten Maschinenvorschübe (vier (s.o.) und einmal nach Versuch 392, Inlay 4, Nr.18, Z, Palliag M) im Vergleich zur Gesamtzahl der 1492 ausgewerteten Versuche sehr klein.

2.2.3. Auswertung der Meßdaten

Die Hauptversuche einschließlich der Versuche mit dem im Abschnitt 'Überprüfung des gesamten Versuchsaufbaus' (2.2.1.7.) beschriebenen Testkörper sind auf 50 3 1/2 Zoll Disketten gespeichert, die eine Kapazität von 270 kByte je Diskette haben. Damit beläuft sich die Summe der gespeicherten Information auf 13,5 MByte (1 MByte = eine Million Byte). Dies entspricht 6,5 Millionen Meßwerten. Um diese sehr große Datenmenge bearbeiten zu können, waren zahlreiche leistungsfähige Programme zu entwickeln.

Eine Verarbeitung der Daten auf dem Rechner HP-85A schied aus, da der Speicher mit dem Programm zum Erfassen der Meßwerte bereits soweit belegt war, daß der verbleibende Speicherplatz bis auf wenige Byte durch das Betriebssystem mit den für das Datenerfassungsprogramm gebrauchten Pointern (Zeigern) für FOR - NEXT Schleifen, für IF - THEN - - ELSE Bedingungen und für Unterprogrammaufrufe benötigt wurde.

Die Entscheidung fiel auf das vorhandene Computersystem der kieferorthopädischen Abteilung der Zahnklinik Nord der FU Berlin (Leiter Prof. Dr. med. dent. R.-R. Miethke), welches der Verfasser dieser Arbeit zum Zwecke der Erstellung kieferorthopädischer Analysen zusammengestellt hat.

Dieser Rechner vom Typ 9920S der Firma Hewlett Packard mit DIN-Tastatur verfügt über einen RAM-Speicher (Random Access Memory = Speicher mit wahlfreiem Zugriff) von 1,17 MByte. Für das Betriebssystem BASIC 3.0 werden davon je nach Umfang der Basic-Befehle und der Schnittstellentreiber ungefähr 0,5 MByte verbraucht. Es bleiben ungefähr 640 kByte für Programm, Variable und eventuell auch RAM-Discs übrig.

Als externe Speicher dienen eine 15 MByte Festplatte und 3 Diskettenlaufwerke für 3 1/2 Zoll Disketten.

Peripherie-Geräte wie Plotter, Matrixdrucker und RGB-Farbmonitor mit RGB-Farbgraphik-Karte (Rot Grün Blau) stehen neben einem monochromen Monitor zur Verfügung.

- 1. Ziele

Die Daten sollen so aufbereitet werden, daß sich Aufbiegungskurven in Abhängigkeit zur einwirkenden Kraft darstellen lassen. Etwaige Fehler bei der Wandlung der Meßwerte (Rauschen) sollen durch die Bildung gleitender Mittelwerte unterdrückt werden. Die Programme sollen so weit wie möglich selbständig ohne die ständige Anwesenheit des Verfassers arbeiten. Fehler bei der während der Versuche vorgenommenen Eingabe der Parameter müssen korrigierbar sein ebenso wie eine jetzt erst vorgenommene Koordinatentransformation aus den protokollierten, unterm Meßmikroskop gemessenen Koordinaten.

- 2. Programme

- 2.1. Programm zum Datentransfer zwischen verschiedenen Rechnern

Wie es bei unterschiedlichen Rechnern üblich ist, ist die Information, die der eine Rechner ablegt, nicht vom anderen Rechner lesbar. Deshalb ist schon vor Ende der Vorversuche nach einer Möglichkeit gesucht worden, mit der die vom HP-85A abgelegten Daten vom HP-9920S gelesen werden können. Über die üblichen Basic-Befehle ist ein Lesen der Daten unmöglich. Eine dem BASIC 3.0 beigefügte (kompilierte) Utility, die ein physikalisches Lesen und Schreiben von einzelnen Sektoren einer Diskette gestattet, ermöglichte die später anstehende Verarbeitung der Meßwerte. Die konsequente Respektierung der Datenblocklänge auf 256 Byte, die genau der Länge eines Sektors entspricht, erleichterte die Überwindung der Barriere der Datenübertragung.

Während der Hauptversuche wurde die Art der Datenabspeicherung des

HP-85A untersucht. Nach Abschluß der Hauptversuche wurden die 50 Disketten einem selbstgeschriebenen Programm unterzogen, welches die HP-85A typische Datenstruktur in besser zugängliche ASCII-Daten (American Standard Code for Information Interchange) umsetzt. Das verwendete Programm bearbeitet nahezu vollautomatisch die in drei Diskettenlaufwerken eingeschobenen Disketten und gibt entsprechend der bearbeiteten Disketten Aufforderungen zum Diskettenwechsel. Während der HP-85A Filenamen mit Leerschritten im Namen erlaubt, kann der HP 9920S auf solche Files mit Leerschritten im Namen, selbst wenn es bereits ASCII-Daten sind, nicht zugreifen. Die Umwandlung dieser Leerzeichen in Unterstreichungsstriche wird von dem gleichen Programm ebenfalls erledigt.
Das Programm benötigte für die Umformatierung der 50 Disketten 7 Stunden ohne Unterbrechung.

Jetzt erst ist es möglich, einzelne Files von den Disketten auf die Festplatte zu kopieren, um weitere Bearbeitungsschritte - automatisch, ohne Diskettenwechsel - vorzunehmen.

- 2.2. Programm zum Ordnen der Meßdaten

Dieses Programm soll folgende Aufgaben lösen:

- ASCII-Daten lesen und in geeigneten Variablen ablegen,
- gleitende Mittelwerte von jeder Quelle von Meßwerten bilden,
- Zeitpunkt des Kraftmaximums aufsuchen,
- falls vorhanden, sollen ein Zwischenmaximum und -minimum selbständig aufgesucht werden.
- Die Meßwerte werden nach den Werten der Kraft von Versuchsanfang bis Kraftmaximum und von Kraftmaximum bis Versuchsende sortiert.
- Die geordneten Meßwerte sollen auf 1 N-Schritte interpoliert

werden, wobei die Interpolationsfaktoren für die weiteren Meßwerte (von den Wegaufnehmern **A,B,1,2,3**) die gleichen sind, die den Kraftwerten derselben Meßwertgruppe (zum gleichen Zeitpunkt) zugrunde gelegt werden. Dieser Verarbeitungsschritt bewirkt eine Komprimierung der Datenmenge bei langsamem Kraftanstieg.

- Zeichnen aller gewünschten Kurven:

  Original

  nach Berechnung der gleitenden Mittelwerte

  nach Sortieren und Interpolieren

- Ablegen der Parameter, der errechneten Werte, und der sortierten und in 1 N-Schritten gestaffelten Meßdaten in neuen Files auf Festplatte,
- automatisches Löschen der bereits bearbeiteten ASCII-Dateien von der Festplatte
- automatisches Kopieren der noch nicht kopierten ASCII-Files auf Festplatte von den eingelegten Disketten
- Anzeige einer Übersicht der kopierten, der unbearbeiteten und der bearbeiteten Files,
- Ausgabe der allgemeinen Parameter in einfacher Form,
- Ausgabe der berechneten Werte einer beliebigen bearbeiteten File.

Das Programm läuft nahezu selbständig und trifft bei fast allen auftretenden Fehlermeldungen alle notwendigen Entscheidungen selbst. Es hat eine Länge von über 55 kByte (Programmlisting 2-zeilig von über 70 DIN A4 Seiten); zusammen mit den Variablen ist ein Speicher von über 210 kByte nötig, eine beim HP-85A mit 30 kByte nicht mögliche Speicherkapazität. Zwischendurch war die Festplatte mehrmals vollständig gefüllt, so daß

ein Löschen der bearbeiteten ASCII-Files nötig war. Das Programm arbeitete effektiv 52 Stunden.

Die gleitenden Mittelwerte wurden bei Meßwerten der Kraft aus jeweils 3 benachbarten Werten gebildet, bei den Wegaufnehmern **A,B** aus 5, bei den Wegaufnehmern **1,2,3** aus 7 Meßwerten.

Zusätzlich zu Parametern und geordneten Werten werden noch folgende errechneten Werte abgespeichert:

Minima der Meßwerte (je Datenquelle)

Zeitpunkte der Minima in 1/20 s

Maxima

Zeitpunkte der Maxima

Anzahl der Versuchsphasen

Anfangswerte

Werte bei Kraftmaximum

Endwerte

Werte bei Zwischenmaximum

Werte bei Zwischenminimum

Anfangswerte gemittelt (gleitende Mittelwerte)

Endwerte gemittelt

Kräfte bei Anfang/Ende der Versuchsphasen

Nummern (Adressen der Anfangs-/Endwerte) der Phasenabschnitte

Zeitpunkte der Phasenabschnitte in 1/20 s

- 2.3. Programm zum Erstellen von Übersichtslisten und von graphischen Darstellungen

Es ist das längste aller Programme: es umfaßt 3500 Programmzeilen in Basic; dies entspricht 140 Seiten DIN A4 bei 2-zeiligem Ausdruck. Das Programm belegt allein 110 kByte Speicher, zusammen mit den Variablen, RAM-Discs und zusätzlichem Speicherbedarf durch ineinandergeschachtelte

Unterprogrammaufrufe und vorübergehend benutzte Variable ist ein Speicherplatz von mehr als 230 kByte (untere Grenze) nötig.

- 2.3.1. Ausdruck von Übersichtslisten

Hierbei kann man mit Hilfe von Auswahlhilfen Versuche nach bestimmten Kriterien suchen lassen. Sowohl die Auswahl nach einzelnen Parametern als auch nach einzelnen errechneten Werten ist einzeln oder auch in Kombination möglich. Diese Auswahlhilfen sind menügesteuert, d. h., daß die Auswahl vollkommen variabel ist. Für die ausgewählten Punkte muß man anschließend die minimalen und maximalen Werte angeben. Als Beispiel seien hier Füllungsnummer, Tag und Uhrzeit des Versuches, Nummer des Versuches bei der jeweiligen Füllung, Anzahl der Versuchsphasen, Kraftmaxima, Zeitdauer des Versuches in 1/20 s Schritten, Y-Koordinaten von Wegaufnehmer **B** und viele andere genannt.
In den Listen werden die Aufbiegung mit und ohne Korrektur (mit Hilfe der Kippungen) bei Kraftmaximum und Versuchsende, ebenso wie die weitere Rückfederung zwischen zwei aufeinanderfolgenden Versuchen angegeben. Auskunft über die maximalen Translationen in X- und Z-Richtung, Kippungen um die X- und Y-Achse, Belastungspunkt (**A**, Z oder **B**) sowie Angaben über Kraftmaximum, Restkraft am Ende eines Versuches, Füllungsmaterial, eventuelle Bemerkungen, die man während der Durchführung der Versuche gemacht hat, werden aufgeführt.
Diese Listen dienen weiter auch als Grundlage für die Erstellung der Balkendiagramme.

- 2.3.2. Graphische Darstellung

Zum einen sollen Kraft-Aufbiegungs-Diagramme einzelner Versuche, zum anderen Balkendiagramme gezeichnet werden.
Die Kraft-Aufbiegungs-Diagramme einzelner oder mehrerer Versuche können

mit oder ohne Korrektur der Aufbiegungen gezeichnet werden, wobei die Linienführung in Abhängigkeit von der momentanen Versuchsphase gewählt wird (durchgezogene Linie für die Phase von Anfang des Versuchs bis zum Kraftmaximum, gestrichelte Linie für eventuelle Zwischenphasen und gepunktete Linie für die letzte Phase von Kraftmaximum bis Versuchsende). Weiterhin besteht auch die Möglichkeit, ein Übersichtsdiagramm zu erstellen, das die 4 Diagramme von Translation in X-Richtung, Drehung um die X-Achse, Drehung um die Y-Achse sowie die Translation in Z-Richtung in Abhängigkeit von der Kraft zeichnen kann, wobei die Linienführung ebenfalls nach den Versuchsphasen gewählt wird.

Die andere Form der graphischen Darstellung ist ein modifiziertes Balkendiagramm: es werden die korrigierten oder unkorrigierten Werte der Aufbiegung bei Kraftmaximum und Versuchsende, sowie die weitere Rückfederung vom Ende des vorangegangenen Versuchs bis zum Anfang des folgenden Versuchs (gestrichelt) gezeichnet. Die Gestaltung der Unterteilung der Achsen geschieht nach Vorgabe der minimalen und maximalen Werte automatisch: vom Programm wird bereits ein Vorschlag aufgrund der darzustellenden Werte angegeben, der entweder nur zu bestätigen oder abzuändern ist.

- 2.4. Hilfsprogramme

Hierbei sei die Datensicherung auf Disketten erwähnt. Alle auf der Festplatte abgelegten Daten könnten bei einem zwar selten vorkommenden Head-Crash vollkommen vernichtet werden, wodurch ein erneutes Bearbeiten aller Versuche notwendig wäre.

Von allen 50 Original-Disketten der Versuche wurden Kopien angefertigt. Es empfiehlt sich, nur mit diesen Kopien zu arbeiten, um die Original-Meßdaten im Notfalle immer noch heranziehen zu können.

2.2.4. Ergebnisse

- 1. Darstellungsformen

Es werden im folgenden drei verschiedene Darstellungsformen verwendet:

- 1.1. modifiziertes Balkendiagramm (Abb. 30, 35 bis 60)

Auf der Abszisse sind die Belastungsnummern abgetragen.

Auf der Ordinate ist die Aufbiegung dargestellt. Es werden 3 Maßstäbe verwendet; ein großer Teilstrich entspricht

2 µm (Abb. 53 bis 60) bzw.

10 µm (Abb. 30, 35 bis 47 und 52) bzw.

50 µm (Abb. 48 bis 51).

Unterhalb der Abszisse sind 2 Reihen mit horizontalen Balken zu erkennen. Die obere Balkenreihe gibt die Belastungszonen wieder (Z = zentral, A = nahe Kontaktpunkt **A**, B = nahe Kontaktpunkt **B**). Die untere Balkenreihe zeigt das Ausmaß der maximalen Belastung in Newton.

Mit der durchgezogenen Linie vor der Markierung der Belastungsnummer ist die Aufbiegung von der Ruhelage zur maximalen Kraft, die in der unteren horizontalen Balkenreihe zu erkennen ist, dargestellt, es folgt immer ein horizontaler Strich zur besseren Anschaulichkeit, dann weiterhin mit durchgezogener Linie die Längenänderung der Füllung nach Entlastung. Da eine Füllung zwischen Ende der vorangegangenen Belastung und Beginn der folgenden Belastung möglicherweise weiter zurückfedert, ist der Übergang gestrichelt dargestellt, wobei ein horizontaler Verlauf keine Längenänderung bedeutet, ein schräger Verlauf dagegen eine Längenabnahme bzw. -zunahme.

- 1.2. Vierfach-Diagramm von der kontinuierlichen Bewegung des Zahnes mit der Füllung (Abb. 34 und 63) bzw. des Testkörpers mit plan polierter Fläche (Abb. 31)

Es sind 4 Diagramme übereinander mit einer gemeinsamen Abszisse zu erkennen. Auf der Abszisse ist die Belastung abgetragen.

Im obersten Diagramm ist die Translation in X-Richtung, im untersten die in Z-Richtung in µm dargestellt.

Im 2. und 3. Diagramm sind die Kippbewegungen des Zahnes um die X- bzw. um die Y-Achse in Winkelsekunden (") bzw. Winkelminuten (') dargestellt.

Die lange durchgezogene Linie an jeder Ordinate ist die Null-Linie.

In den Einzeldiagrammen sind die Kurven unter Belastung durchgezogen, die bei Entlastung gepunktet dargestellt.

Die Zahlen am rechten Ende der Kurvenzüge zeigen die Nummer der Belastung, in Klammern steht die Belastungszone (A,Z,B), wie in der 1. Darstellungsform beschrieben.

- 1.3. kontinuierliche Aufbiegungskurven (Abb. 32, 33 und 62)

Auf der Abszisse ist die Belastung in Newton abgetragen. Die Ordinate gibt die Längenänderung der Füllung an.

Für durchgezogene und gepunktete (bei Abb. 33 zur besseren Unterscheidbarkeit der 2 Aufbiegungskurven gestrichelte) Linien, ebenso für die Beschriftung rechts an der Aufbiegungskurve gilt dasselbe wie bei der 2. Darstellungsform.

- 2. Reproduzierbarkeit

Dazu werden die Ergebnisse der 10 Palliag-Inlays für Zahn 1, die in zwei Güssen hergestellt wurden, verglichen. Um die Inlays einfach auswechseln und dann vergleichen zu können, ist es notwendig, keines der Inlays zu zementieren.

Es zeigen sich folgende Ergebnisse:

- die Aufbiegungen sind gleich vor Herausnehmen und nach Wieder-

einsetzen desselben Inlays: Abb. 30 ist ausgewählt, da hier die größte Aufbiegung stattfindet; dies ermöglicht eine bessere Darstellung, ohne daß Meßfehler eine große Rolle spielen können.

- bei 70 N zentraler Belastung liegen die dynamischen Aufbiegungen zwischen 2 µm und 7 µm, bei 200 N zentrischer Belastung zwischen 6 µm und 18 µm (bei Inlay 10 sind es 51 µm)
- exzentrische Belastungen verursachen Aufbiegungen in gleicher Größenordnung
- es ist kein Unterschied zwischen Versuchen mit dem erstmalig eingespannten Zahn und dem wiederholt eingespannten Zahn festzustellen
- die bleibende Aufbiegung liegt bei Kräften unter 200 N unterhalb von 5 µm (20 µm werden bei Inlay 10 erreicht: dies ist mit auf die konische Präparationsform zurückzuführen, wobei das Inlay beim Einsetzen unter Spannung gebracht wird).
- die Aufbiegung ist von Inlay zu Inlay individuell unterschiedlich, bei ein und demselben Inlay dagegen sehr gleichmäßig.

Geringe Abweichungen der Aufbiegungen bei verschiedenen Belastungsnummern (Abb. 30) sind auf geringfügiges Abrunden der Spitzen beim Auswechseln des Inlays und auf Drift der Meßgeräte, die sich erst bei Werten nach Überschreiten des Meßbereiches, wie z.B. vorübergehender Kontaktlosigkeit bei Auswechseln des Inlays, bemerkbar macht, zurückzuführen.

- 3. Ausmaß der Kippungen

- 3.1. - am Testkörper gemessen

In Abb. 31 sind die Kippungen und Translationen des Testkörpers (bezeichnet mit "Füllung 56"), bestehend aus einem 5 cm langen Gewindestück mit plan polierter Oberfläche, dargestellt:

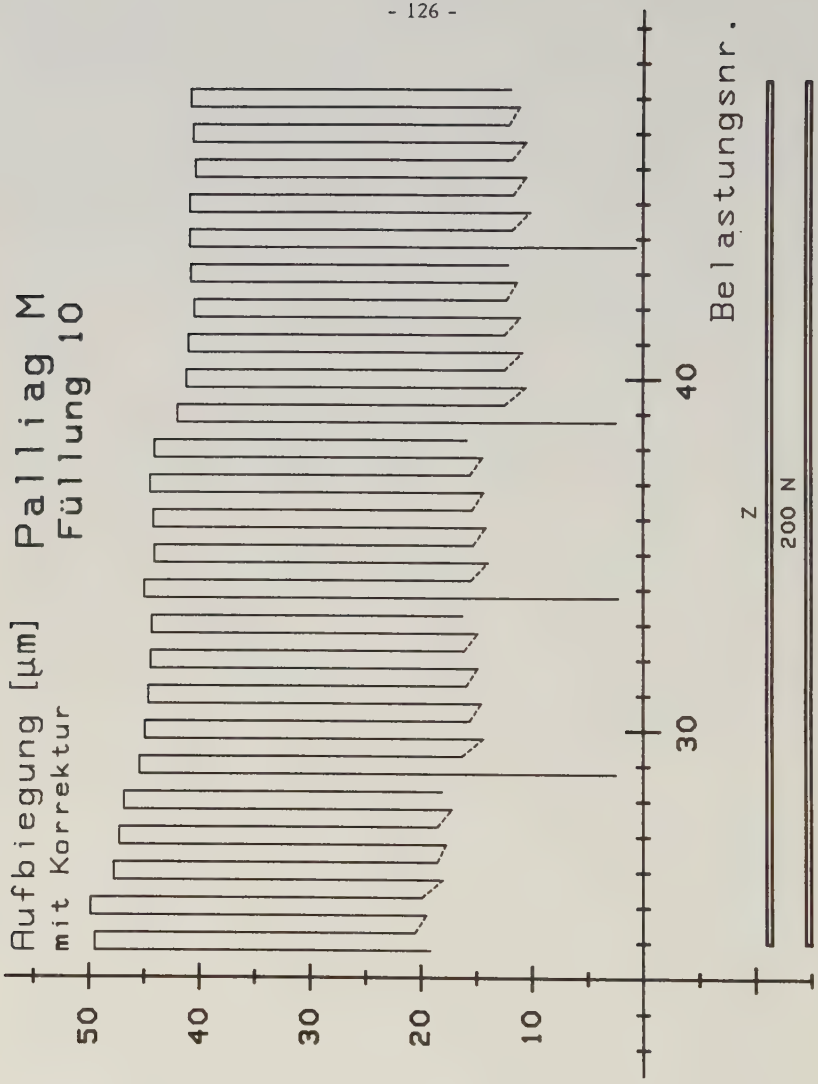


Abb. 30: Belastungen 24 bis 48 von Inlay 10:

Belastungsnummer 24 bis 28 vor dem Herausnehmen,

Belastungsnummer 29 nach dem 1.Wiedereinsetzen,

B.-Nr. 34 nach dem 2., B.-Nr. 39 nach dem 3. und B.-Nr. 44 nach dem 4.Wiedereinsetzen.

Die Aufbiegung von Inlay 10 ist mehr als doppelt so groß wie die der Inlays 1-9.

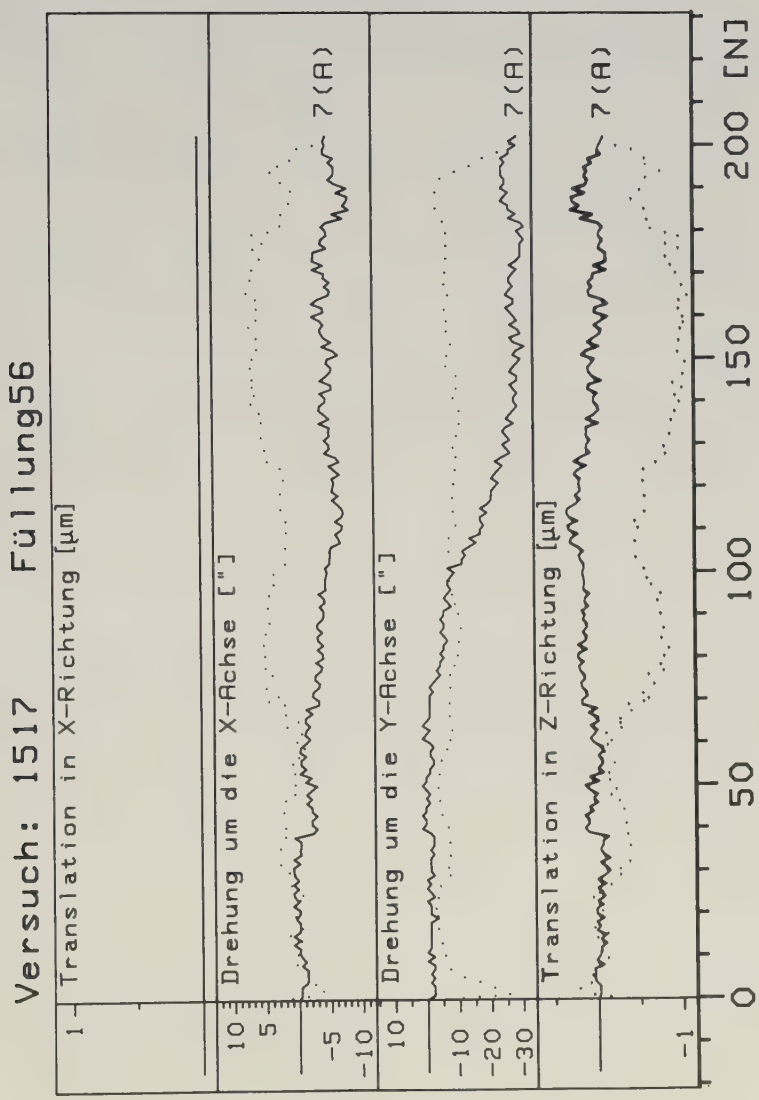


Abb. 31: Vierfach-Diagramm der kontinuierlichen Bewegung des Testkörpers mit plan polierter Oberfläche

es findet nahezu keine Kippung um die X-Achse (mesio-distaler Verlauf) statt,

die Kippung um die Y-Achse (bukko-lingual gerichtet) geht bis 30" = 0,5'

Translation in negativer Z-Richtung von nur 1 µm (die Z-Achse verläuft wie die Zahnachse).

Die durchgezogenen Kurvenzüge gehören zur Belastung vor Erreichen des Kraftmaximums, die gepunkteten danach.

- 3.2. - an den Zähnen gemessen

Die Kippungen um die Y-Achse sind im Bereich von 1' bis 4' mit einem einmaligen Maximalwert von 15' = 1/4° anzutreffen.

- 4. Aufbiegungen von Gußfüllungen

Die Aufbiegung einer Füllung geschieht proportional zur Kraft (Abb. 32): die Abhängigkeit ist allerdings nicht vollkommen linear.

Es sind auch Unterschiede zwischen der Belastungskurve (durchgezogene Linie) und der Entlastungskurve (gepunktete Linie) zu sehen. Dies weist darauf hin, daß die Füllung Energie absorbiert hat, wodurch es auch zu bleibenden Verformungen kommen kann.

Ausgangspunkt der mesio-distalen Länge und Endpunkt fallen nicht zusammen.

Zwischen zwei aufeinanderfolgenden Versuchen erfolgt noch eine geringe Rückstellung der Aufbiegung, wie dies in Abb. 33 zu erkennen ist. Bemerkenswert ist die deutlich geringere weitere Aufbiegung bei einer zweiten Belastung: die Kurven von 1. und 2. Belastung fallen nahezu zusammen. Es ist deshalb wichtig, die 1. Aufbiegungskurve aufzuzeichnen, da sonst die Eigenschaften eines Materials zu günstig erscheinen; man fände dann z.B. keine bleibende Verformung. Die Ursache für die nicht schlechter

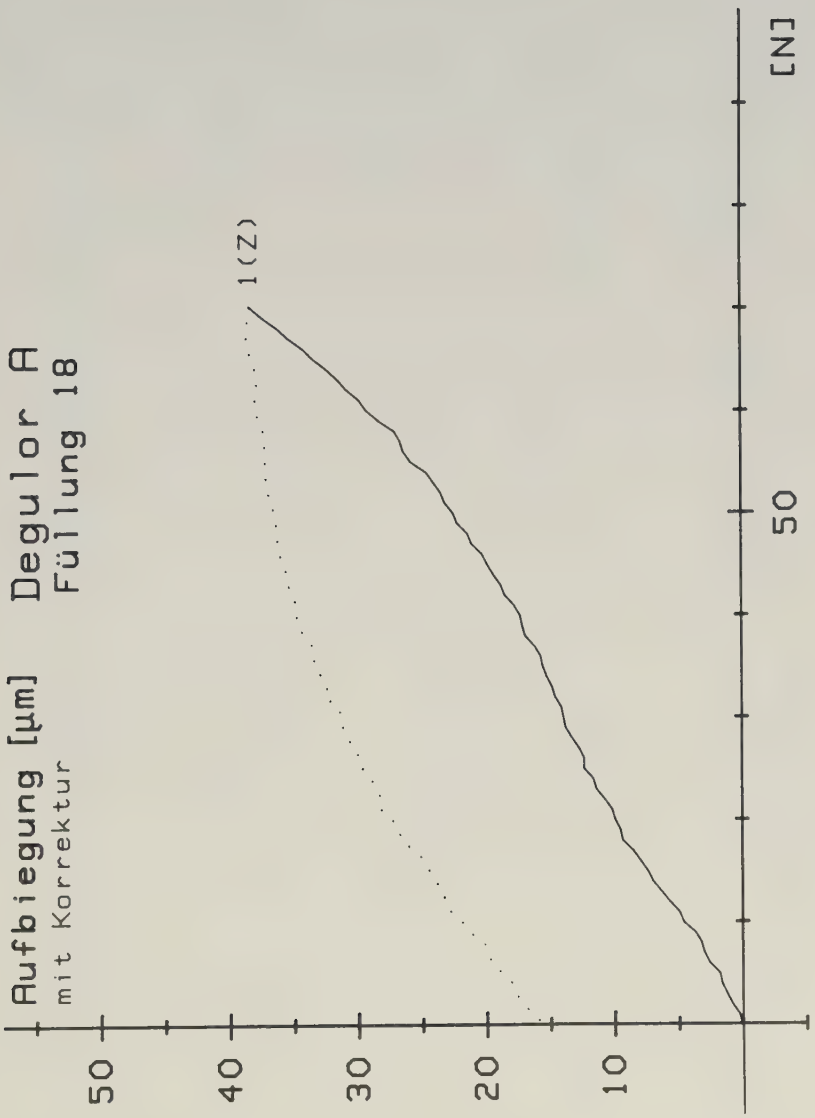


Abb. 32: kontinuierliche Aufbiegungskurve der 1. Belastung von Füllung 18

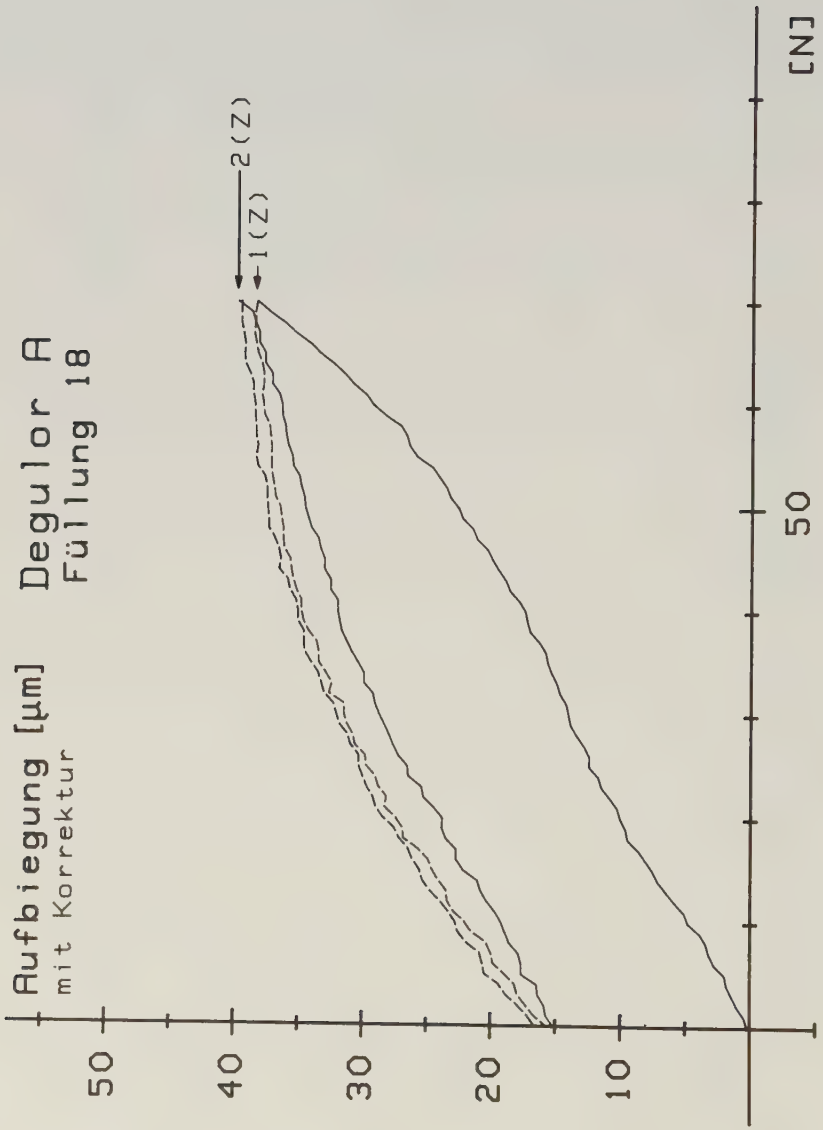


Abb. 33: kontinuierliche Aufbiegungskurve der 1. und 2. Belastung von Füllung 18

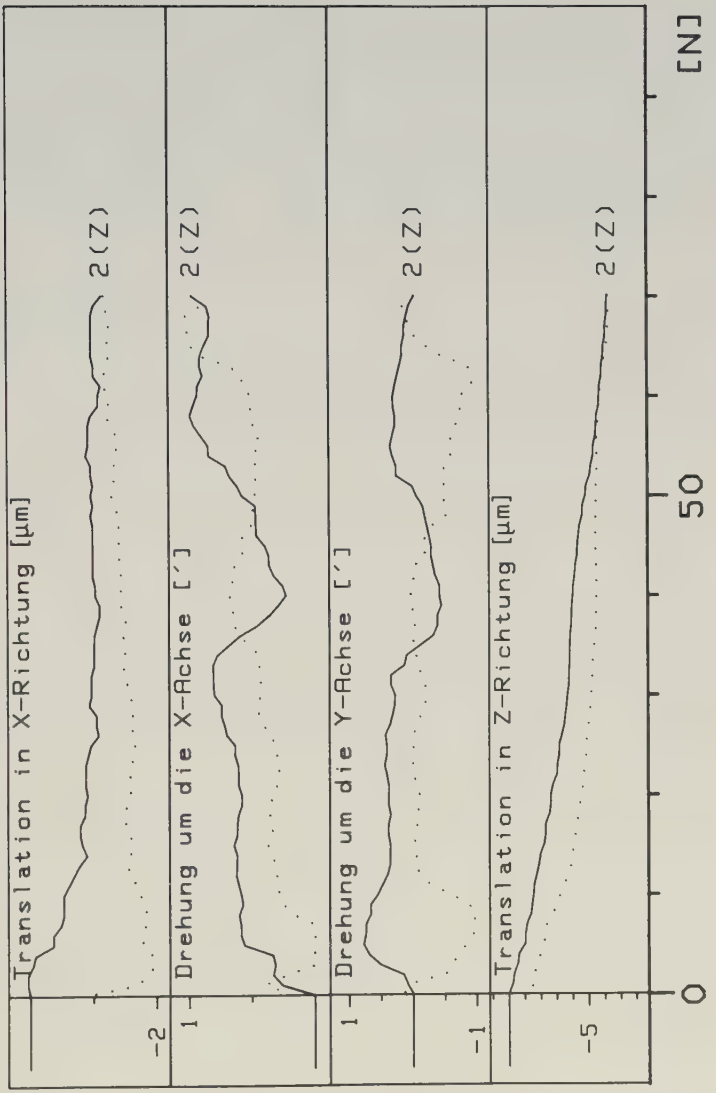


Abb. 34: Vierfach-Diagramm der kontinuierlichen Bewegung des 2. Zahnes bei 2. Belastung von Füllung 18

werdenden Ergebnisse ist bei der Kalthärtung zu suchen, die bei Degulor A bei diesen Kräften stattfindet.

In Abb. 34 sind die Translationen in X- und Z-Richtung und die Kippungen um X- und Y-Achse vom 2. Versuch mit Inlay 18 dargestellt. Die Kippungen sind sehr gering bei zentrischer Belastung. Die Unregelmäßigkeiten der beiden Kurven weisen auf Unsicherheiten bei der Erfassung der Kippungen hin.

Recht linear verläuft die Translation in negativer Z-Richtung: diese ist sehr gering (5 µm). Die Translation in X-Richtung weist auf eine ungleichmäßige Aufbiegung der beiden approximalen Seiten hin.

- 4.1. Aufbiegungen bei zierlicher Kavität

Abbildungen 35 bis 40 zeigen Aufbiegungen der Füllungen für Zahn 2 aus den Materialien Palliag M (Abb. 35 und 36), Degulor M (Abb. 37 und 38) und Degulor A (Abb. 39 und 40).

Die Abbildungen 35, 37 und 39 stellen von der Aufbiegung her günstige Inlays, die Abb. 36, 38 und 40 ungünstigere Inlays dar.

Zwischen den Inlays eines Materials sind individuelle Unterschiede bis zum Verhältnis 2:1 zu verzeichnen.

Die Aufbiegungen von Inlays aus Palliag M, Degulor M und Degulor A verhalten sich wie 1 : 2 : 2,5 bei einer Belastung von 200 N; bei 70 N ist das Verhältnis 1 : 1,5 : 3 . Daraus ist abzuleiten, daß die Goldlegierungen von der Aufbiegung her - die weicheren Legierungen besonders bei geringeren Belastungen - der härteren Silber-Palladium-Legierung unterlegen sind.

Die bleibenden Aufbiegungen betragen im Mittel ungefähr 2 µm (Palliag M), 6 µm (Degulor M), 22 µm (Degulor A). Weitere Angaben sind den Tabellen 6 bis 13 zu entnehmen.

- 4.2. Aufbiegungen bei untiefer, zierlicher Kavität

Der Trend, daß härtere Legierungen weniger Aufbiegung zulassen, bestätigt sich auch bei den Inlays 25 bis 27 (Abb. 41 bis 43) für Zahn 3 . Auffallend ist jedoch, daß Palliag M deutlich schlechter abschneidet als zuvor gegenüber Degulor M: bei der ersten Belastung findet eine dynamische Aufbiegung von 27 µm statt, wovon 13 µm nach Entlastung noch übrigbleiben. Die Füllung 26 aus Degulor M zeigt weniger bleibende Aufbiegung als die Füllungen 17 bis 19.

Ähnlich wie die Aufbiegung bei Füllung 25 besonders durch die 1. Belastung hervorgerufen wird, geschieht dies auch mit Füllung 27 (Degulor A), jedoch mit dem vom Degulor A her schon beschriebenen doppelten Ausmaß der Aufbiegung.

Da die Höhe im okklusalen Bereich der Inlays 25 bis 27 ungefähr 0,3 mm geringer ist als die der Inlays 1 bis 19, ist die Größenordnung der Aufbiegung der Füllungen für die etwas zierlichere, weniger tiefe Kavität deutlich größer.

- 4.3. Aufbiegungen bei mittlerer Kavität

Bei den Inlays für Zahn 4 schneidet Degulor A (Inlay 24, Abb. 47) deutlich am schlechtesten ab, Degulor M (Inlay 23, Abb. 46) zeigt neben dem Inlay 21 (Abb. 45) aus Palliag M die günstigsten Ergebnisse.

Die bei Inlay 21 bleibende negative Aufbiegung ist durch ein besseres Einfügen des Inlays in die Kavität während der ersten Belastung zu erklären; mit dem Eingliedern von Hand wurde offenbar noch nicht die Endlage erreicht.

Inlay 20 (Abb. 44) aus Palliag M zeigt doppelt so hohe Werte der Aufbiegung wie Inlay 21 (Abb. 45).

Es ist ersichtlich, daß die Aufbiegungen individuell von den Inlays abhängig

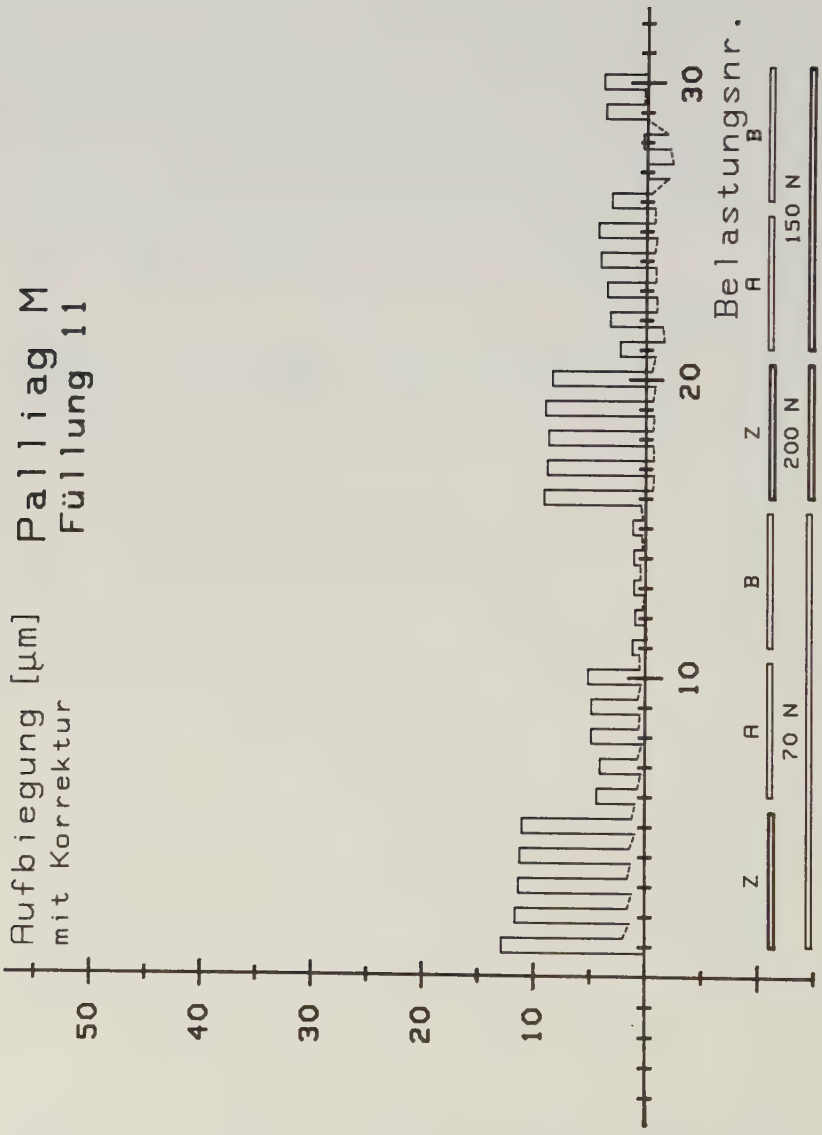


Abb. 35: modifiziertes Balkendiagramm der Aufbiegungen von Füllung 11 bei Zahn 2 mit zierlicher Kavität

Abb. 36: modifiziertes Balkendiagramm der Aufbiegungen von Füllung 12 bei Zahn 2 mit zierlicher Kavität

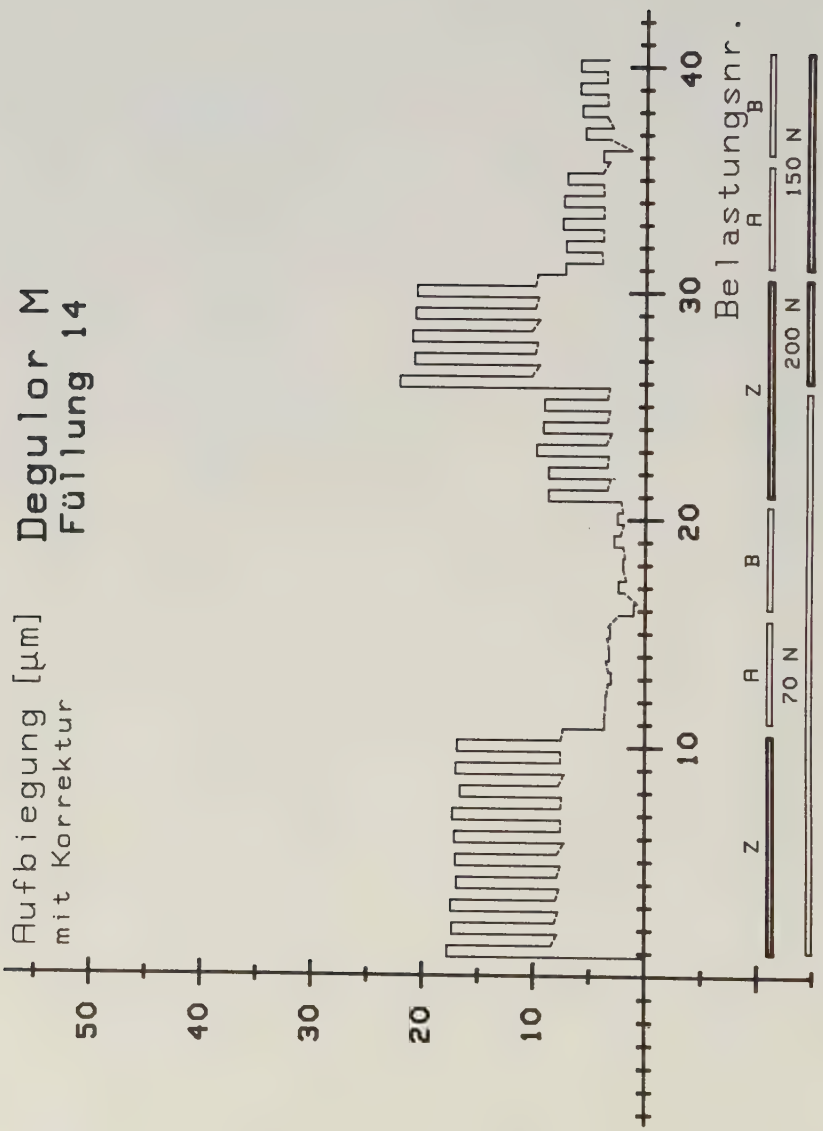


Abb. 37: modifiziertes Balkendiagramm der Aufbiegungen von Füllung 14 bei Zahn 2 mit zierlicher Kavität

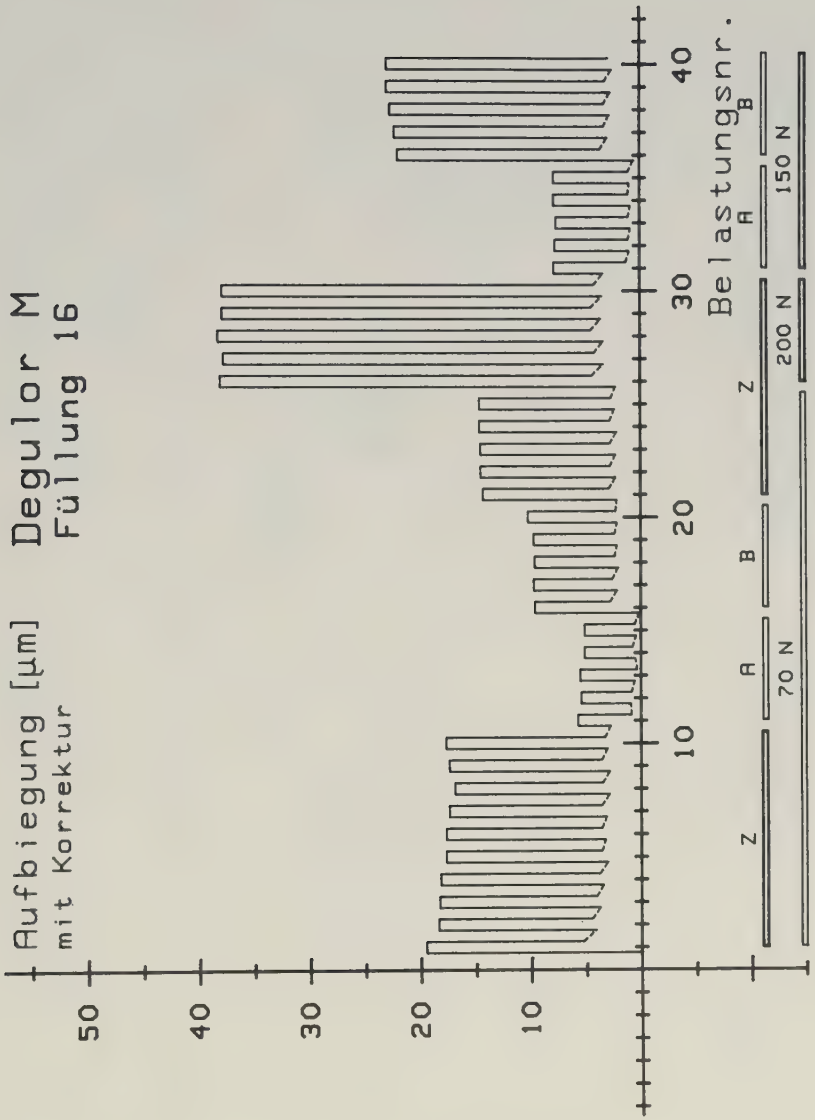


Abb. 38: modifiziertes Balkendiagramm der Aufbiegungen von Füllung 16 bei Zahn 2 mit zierlicher Kavität

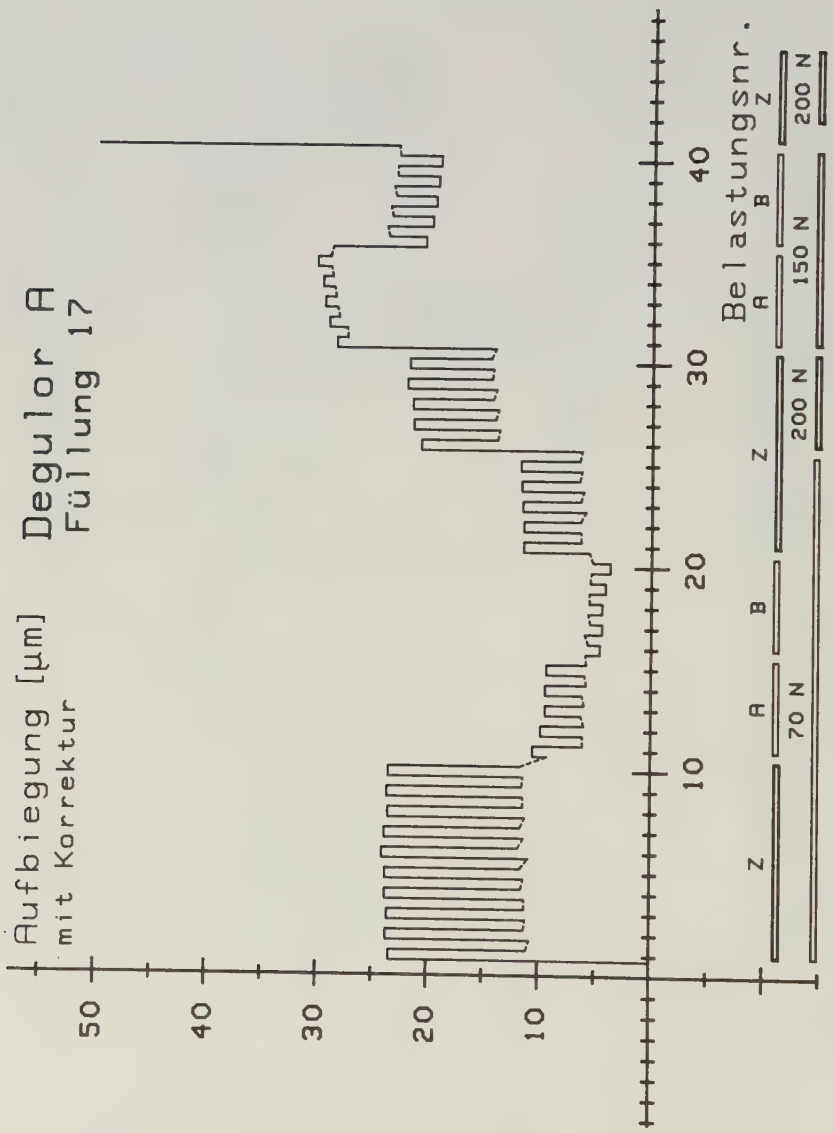


Abb. 39: modifiziertes Balkendiagramm der Aufbiegungen von Füllung 17 bei Zahn 2 mit zierlicher Kavität

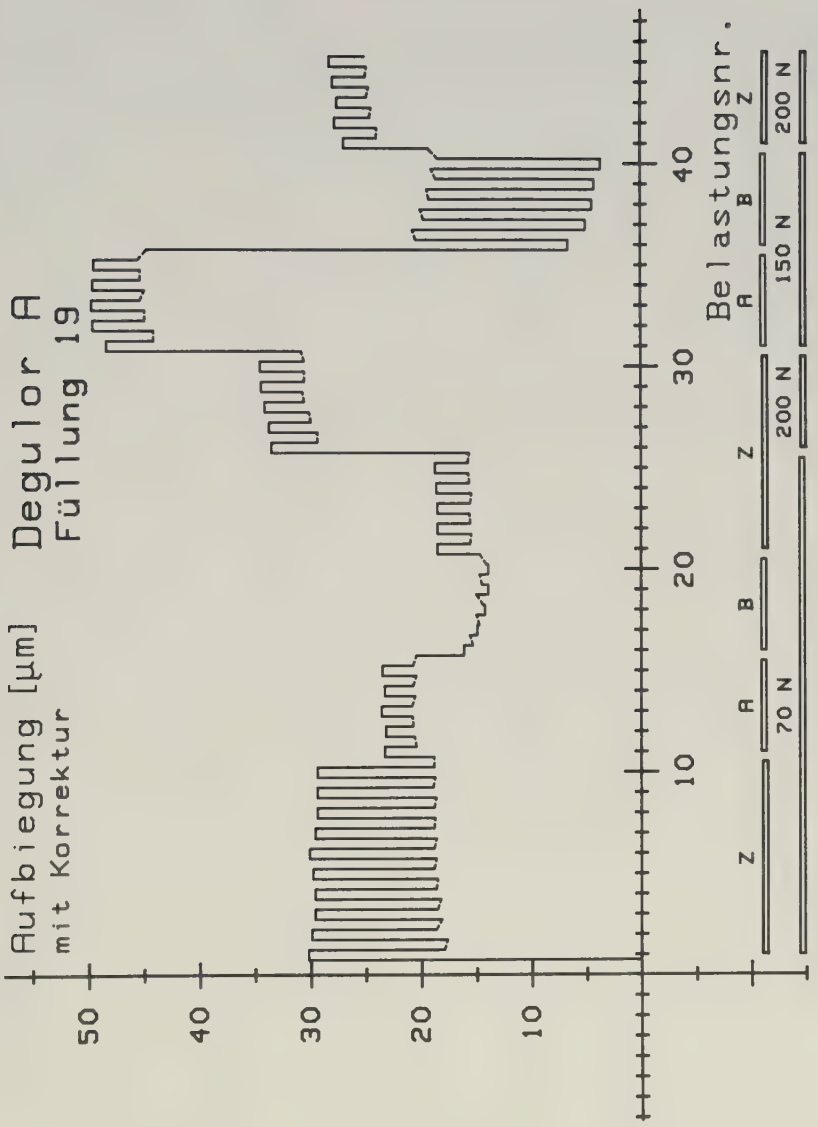


Abb. 40: modifiziertes Balkendiagramm der Aufbiegungen von Füllung 19 bei Zahn 2 mit zierlicher Kavität

	Zahn 1			Zahn 2			Zahn 3			Zahn 4		
	zierliche Kavität			zierliche Kavität			zierliche, untiefe Kavität			mittlere Kavität		
Material	n	$\bar{x}$	max. [µm]	n	$\bar{x}$	max. [µm]	n	$\bar{x}$	max. [µm]	n	$\bar{x}$	max. [µm]
Goldleg. Typ 1	--	--	--	3	12	18	1	30	-	1	12	-
Goldleg. Typ 4	--	--	--	3	4	8	1	2	-	1	1	-
Silberpalladiumleg.	10	2	15	3	1	2	1	12	-	3	0	0
Amalgam	1	0,2	-	1	0,3	-	1	0	-	1	0	-

Tabelle 6: bleibende Aufbiegung bei zentrischer Belastung mit 70 N

	Zahn 1			Zahn 2			Zahn 3			Zahn 4		
	zierliche Kavität			zierliche Kavität			zierliche, untiefe Kavität			mittlere Kavität		
Material	n	$\bar{x}$	max. [µm]	n	$\bar{x}$	max. [µm]	n	$\bar{x}$	max. [µm]	n	$\bar{x}$	max. [µm]
Goldleg. Typ 1	--	--	--	3	22*	190	1	59	-	1	31	-
Goldleg. Typ 4	--	--	--	3	6	10	1	3	-	1	1	-
Silberpalladiumleg.	10	3	20	3	1	2	1	14	-	3	0	0
Amalgam	1	0,5	-	1	0	-	1	0	-	1	0,5	-

Tabelle 7: bleibende Aufbiegung bei zentrischer Belastung mit 200 N

* Der Maximalwert von 190 µm (Inlay 18) ist nicht bei der Ermittlung des Mittelwertes eingeflossen.

	Zahn 1			Zahn 2			Zahn 3			Zahn 4		
	zierliche Kavität			zierliche Kavität			zierliche, untiefe Kavität			mittlere Kavität		
Material	n	$\bar{x}$	max. [µm]	n	$\bar{x}$	max. [µm]	n	$\bar{x}$	max. [µm]	n	$\bar{x}$	max. [µm]
Goldleg. Typ 1	--	--	--	3	8	20	1	43	-	1	12	-
Goldleg. Typ 4	--	--	--	3	3	4	1	4	-	1	1	-
Silberpalladiumleg.	10	3	7	3	1	1	1	13	-	3	0	1
Amalgam	1	0,5	-	1	0,4	-	1	0	-	1	0	-

Tabelle 8: bleibende Aufbiegung bei exzentrischer Belastung mit 70 N

	Zahn 1			Zahn 2			Zahn 3			Zahn 4		
	zierliche Kavität			zierliche Kavität			zierliche, untiefe Kavität			mittlere Kavität		
Material	n	$\bar{x}$	max. [µm]	n	$\bar{x}$	max. [µm]	n	$\bar{x}$	max. [µm]	n	$\bar{x}$	max. [µm]
Goldleg. Typ 1	--	--	--	3	36*	217	1	49	-	1	36	-
Goldleg. Typ 4	--	--	--	3	4	5	1	5	-	1	1	-
Silberpalladiumleg.	10	5	9	3	1	1	1	16	-	3	0	1
Amalgam	1	0,5	-	1	0,3	-	1	0	-	1	0,4	-

Tabelle 9: bleibende Aufbiegung bei exzentrischer Belastung mit 150 N

* Der Maximalwert von 217 µm (Inlay 18) ist nicht bei der Ermittlung des Mittelwertes eingeflossen.

Material	Zahn 1 zierliche Kavität			Zahn 2 zierliche Kavität			Zahn 3 zierliche, untiefe Kavität			Zahn 4 mittlere Kavität		
	n	$\bar{x}$	max. [µm]	n	$\bar{x}$	max. [µm]	n	$\bar{x}$	max. [µm]	n	$\bar{x}$	max. [µm]
Goldleg. Typ 1	--	--	--	3	31	41	1	50	-	1	18	-
Goldleg. Typ 4	--	--	--	3	15	19	1	13	-	1	9	-
Silberpalladiumleg.	10	5	25	3	10	14	1	26	-	3	7	12
Amalgam	1	0,6	-	1	0,8	-	1	0,9	-	1	0,5	-

Tabelle 10: dynamische Aufbiegung bei zentrischer Belastung mit 70 N

Material	Zahn 1 zierliche Kavität			Zahn 2 zierliche Kavität			Zahn 3 zierliche, untiefe Kavität			Zahn 4 mittlere Kavität		
	n	$\bar{x}$	max. [µm]	n	$\bar{x}$	max. [µm]	n	$\bar{x}$	max. [µm]	n	$\bar{x}$	max. [µm]
Goldleg. Typ 1	--	--	--	3	34*	210	1	70	-	1	42	-
Goldleg. Typ 4	--	--	--	3	28	37	1	34	-	1	9	-
Silberpalladiumleg.	10	13	51	3	15	24	1	39	-	3	12	21
Amalgam	1	0,6	-	1	2	-	1	2	-	1	1	-

Tabelle 11: dynamische Aufbiegung bei zentrischer Belastung mit 200 N

* Der Maximalwert von 210 µm (Inlay 18) ist nicht bei der Ermittlung des Mittelwertes eingeflossen.

	Zahn 1			Zahn 2			Zahn 3			Zahn 4		
	zierliche Kavität			zierliche Kavität			zierliche, untiefe Kavität			mittlere Kavität		
Material	n	$\bar{x}$	max. [µm]	n	$\bar{x}$	max. [µm]	n	$\bar{x}$	max. [µm]	n	$\bar{x}$	max. [µm]
Goldleg. Typ 1	--	--	--	3	24	37	1	45	-	1	18	-
Goldleg. Typ 4	--	--	--	3	7	10	1	10	-	1	5	-
Silberpalladiumleg.	10	4	13	3	6	13	1	28	-	3	6	14
Amalgam	1	1	-	1	0,9	-	1	1	-	1	0,5	-

Tabelle 12: dynamische Aufbiegung bei exzentrischer Belastung mit 70 N

	Zahn 1			Zahn 2			Zahn 3			Zahn 4		
	zierliche Kavität			zierliche Kavität			zierliche, untiefe Kavität			mittlere Kavität		
Material	n	$\bar{x}$	max. [µm]	n	$\bar{x}$	max. [µm]	n	$\bar{x}$	max. [µm]	n	$\bar{x}$	max. [µm]
Goldleg. Typ 1	--	--	--	3	35*	226	1	51	-	1	42	-
Goldleg. Typ 4	--	--	--	3	13	21	1	20	-	1	6	-
Silberpalladiumleg.	10	8	20	3	8	16	1	40	-	3	9	18
Amalgam	1	0,7	-	1	2	-	1	2	-	1	1	-

Tabelle 13: dynamische Aufbiegung bei exzentrischer Belastung mit 150 N

* Der Maximalwert von 226 µm (Inlay 18) ist nicht bei der Ermittlung des Mittelwertes eingeflossen.

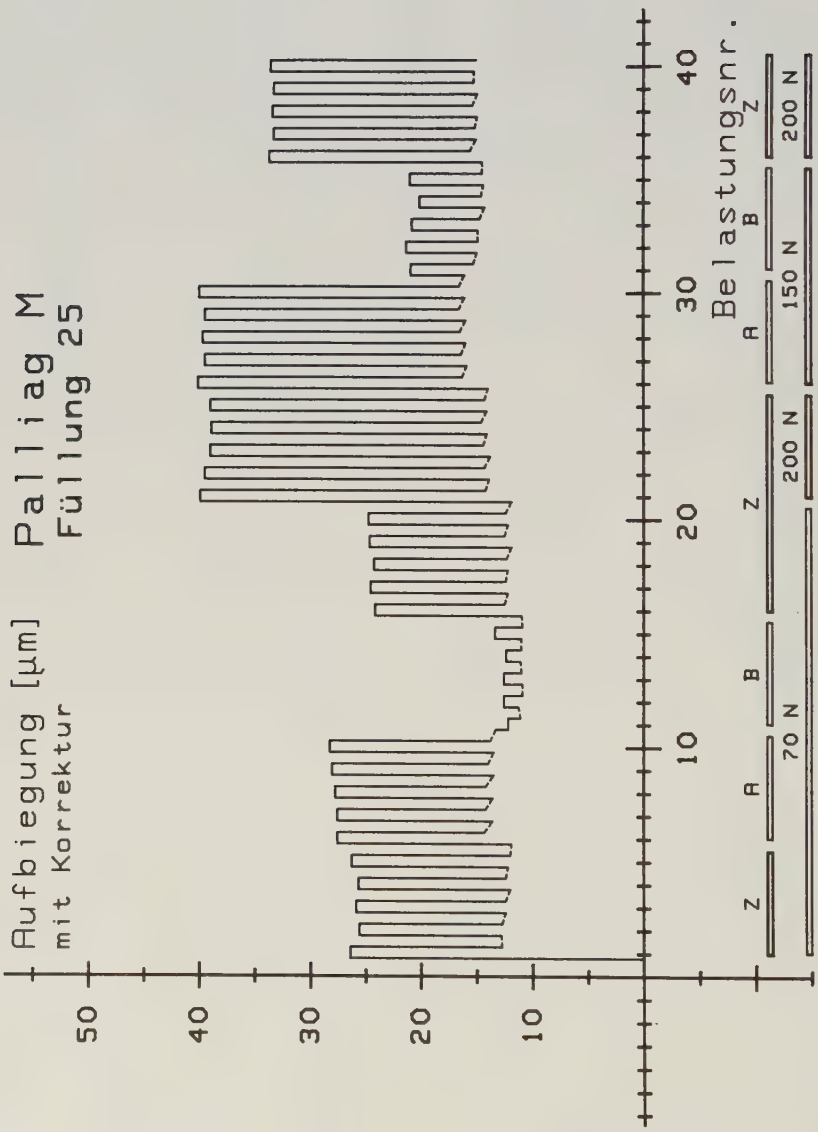


Abb. 41: modifiziertes Balkendiagramm der Aufbiegungen von Füllung 25 bei Zahn 3 mit zierlicher, untiefer Kavität

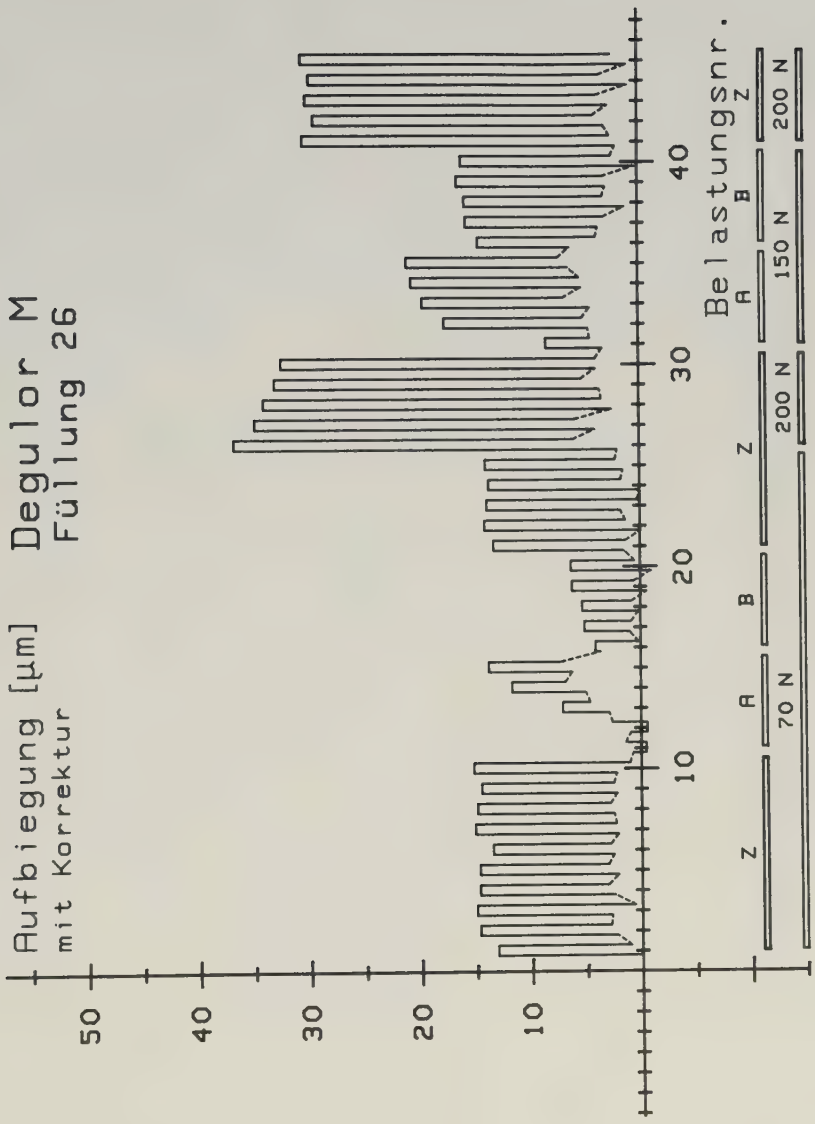


Abb. 42: modifiziertes Balkendiagramm der Aufbiegungen von Füllung 26 bei Zahn 3 mit zierlicher, untiefer Kavität

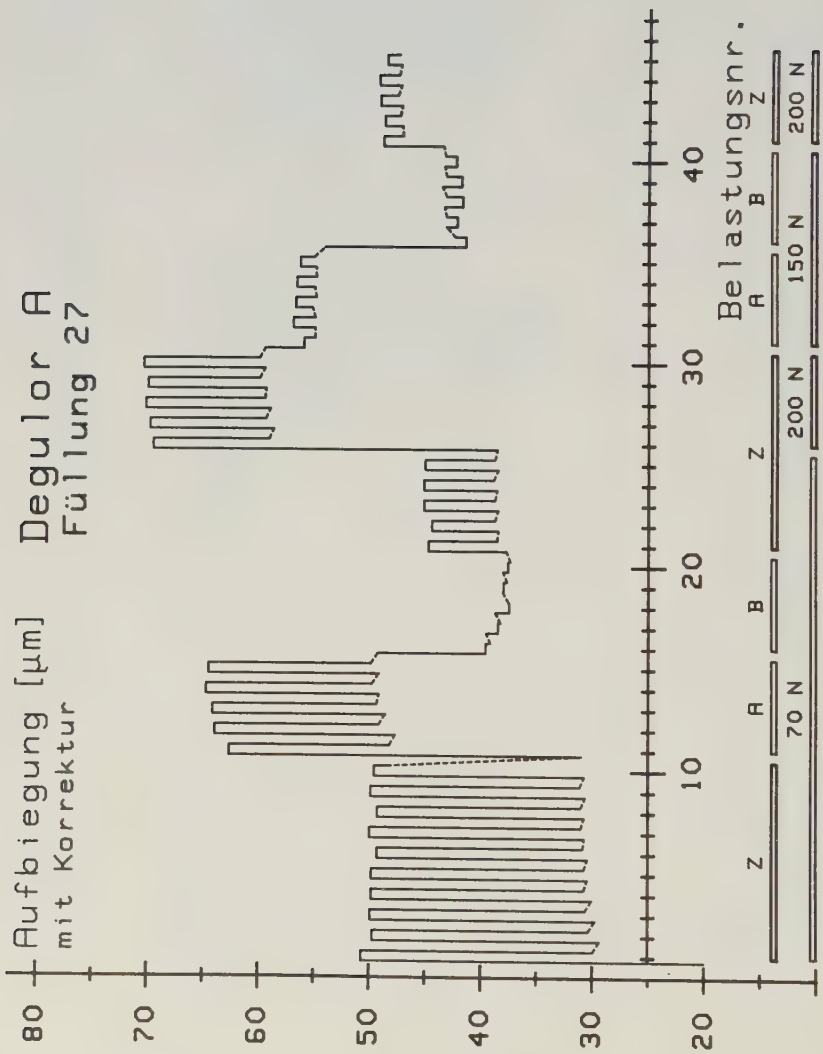


Abb. 43: modifiziertes Balkendiagramm der Aufbiegungen von Füllung 27 bei Zahn 3 mit zierlicher, untiefer Kavität

sind bei gleichem Guß und gleicher Kavität. Es kann daher nur der allgemeine Trend der Aufbiegung von Füllungen unterschiedlichen Materials gezeigt werden.

- 5. Belastungsspitzen

Durch plötzliche, schnelle und unkontrollierte Maschinenvorschübe der Universalprüfmaschine werden z.T. Kräfte erzeugt, die 200 N und auch selbst 300 N mit Sicherheit überschritten haben. Die genaue Kraft konnte nicht ermittelt werden, da diese Kraftgrößen den Meßbereich deutlich verlassen haben.

Durch die Belastungsspitzen ist die Aufbiegung von Palliag M bei

Inlay 4, B.-Nr.18 auf 62 µm,

Inlay 10, B.-Nr.56 auf 78 µm, bleibend 54 µm(Abb. 48)

angestiegen. Diese Werte sind in Tab. 6 bis 13 nicht berücksichtigt.

Bei Degulor M wurden bei

Inlay 23, B.-Nr.15 25 µm dynamische, jedoch keine bleibende Aufbiegung (Abb. 46) gefunden.

Bei Degulor A blieben dynamische und bleibende Aufbiegung bei

Inlay 17, B.-Nr.41 bei 142 µm (Abb. 49).

Demgegenüber kann man bei Inlay 18 (Abb. 50) mit Degulor A bereits bei einer Belastung von 200 N eine Aufbiegung von 210 µm (dynamisch) bzw. 190 µm (bleibend) erkennen. Dieses Inlay biegt sich deutlich stärker auf als die Inlays 17 (Abb. 39) und 19 (Abb. 40) desselben Gusses und desselben Zahnes.

Zum besseren Vergleich der Aufbiegungen von Palliag-Inlay (Abb. 48) und Inlay aus Degulor A mit (Abb. 49) und ohne (Abb. 50) Belastungsspitzen (mit erhöhter Aufbiegung) ist das modifizierte Balkendiagramm von Abbildung 43 (ohne Belastungsspitzen) in den entsprechenden Maßstab umgesetzt

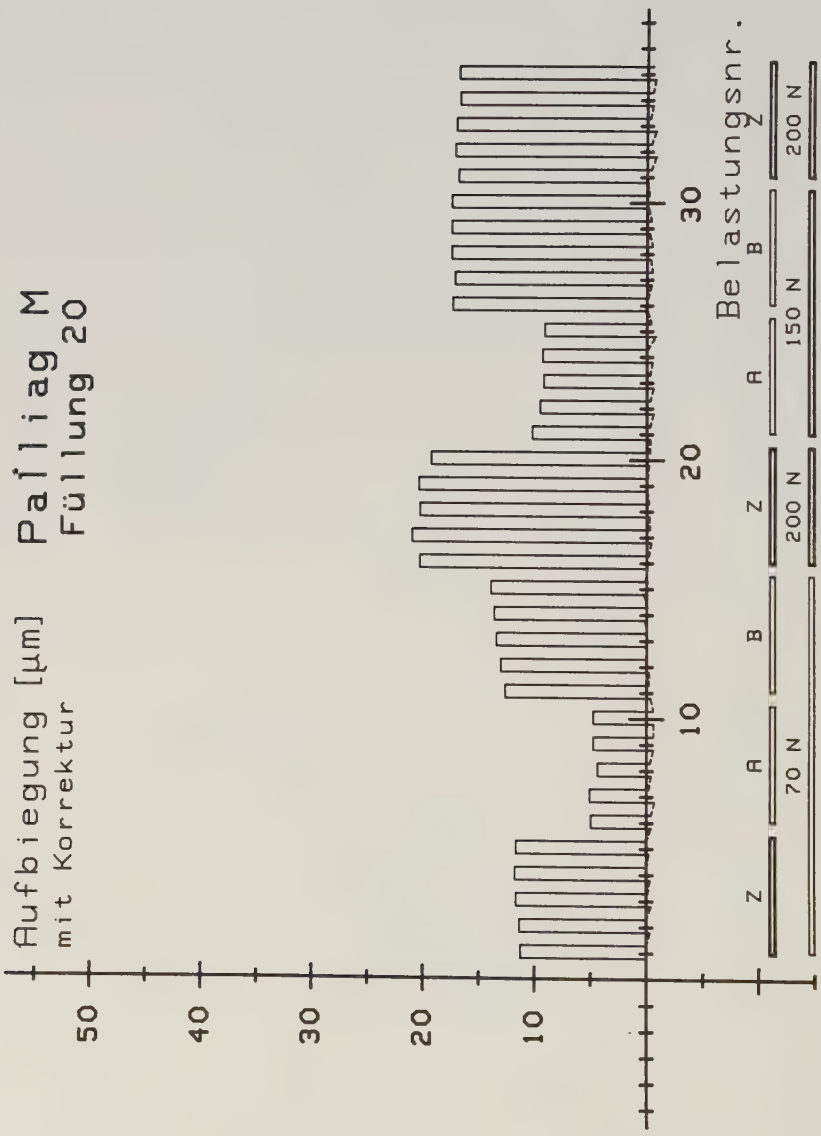


Abb. 44: modifiziertes Balkendiagramm der Aufbiegungen von Füllung 20 bei Zahn 4 mit mittlerer Kavität

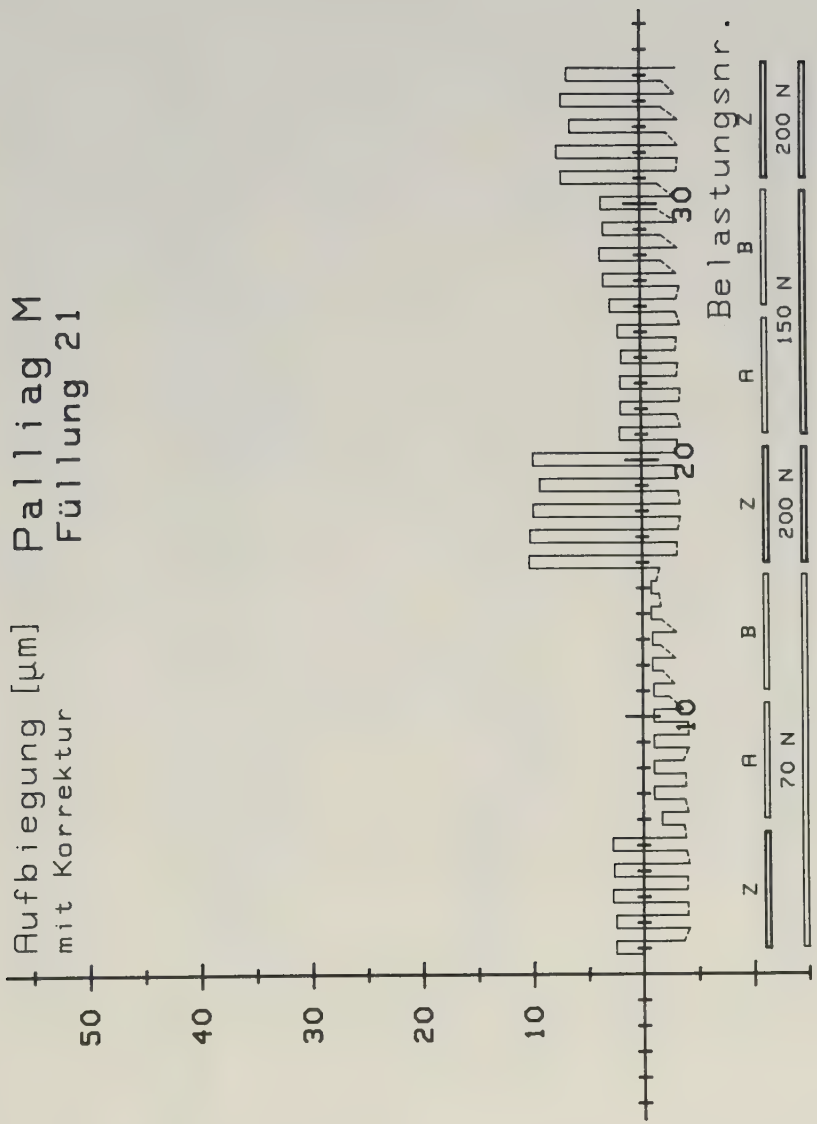


Abb. 45: modifiziertes Balkendiagramm der Aufbiegungen von Füllung 21 bei Zahn 4 mit mittlerer Kavität

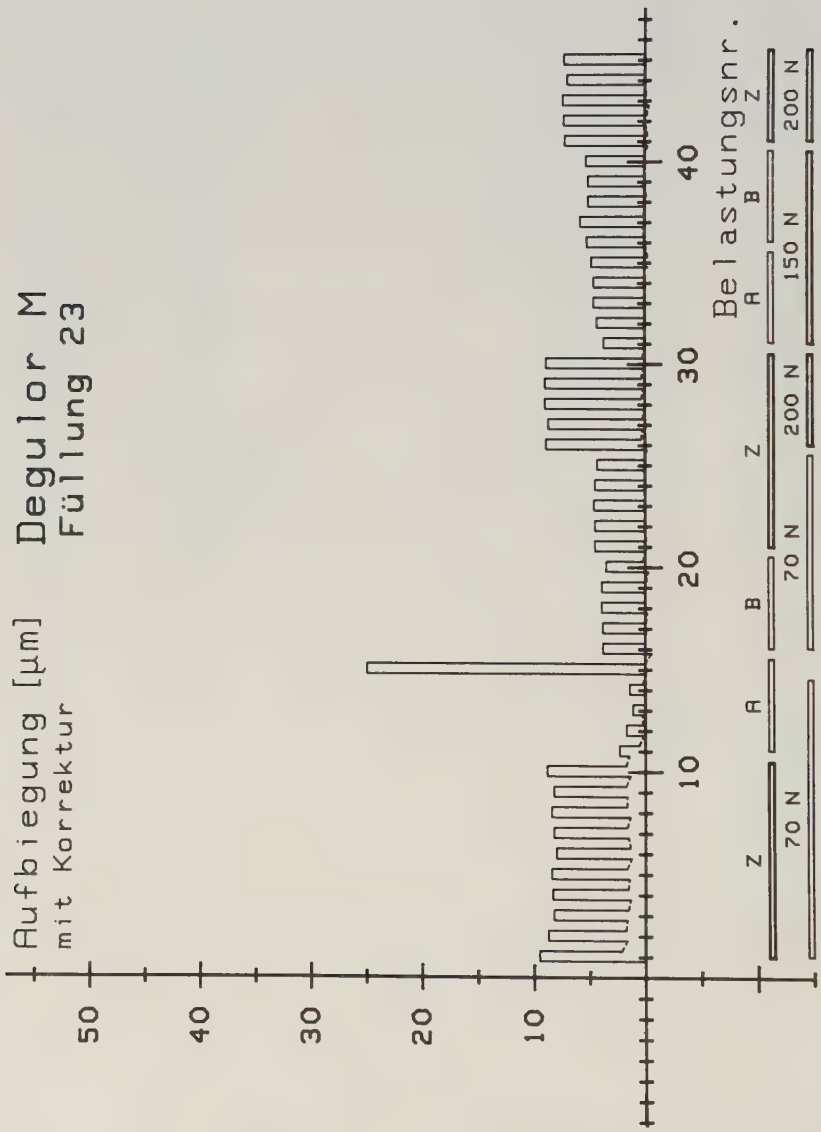


Abb. 46: modifiziertes Balkendiagramm der Aufbiegungen von Füllung 23 bei Zahn 4 mit mittlerer Kavität

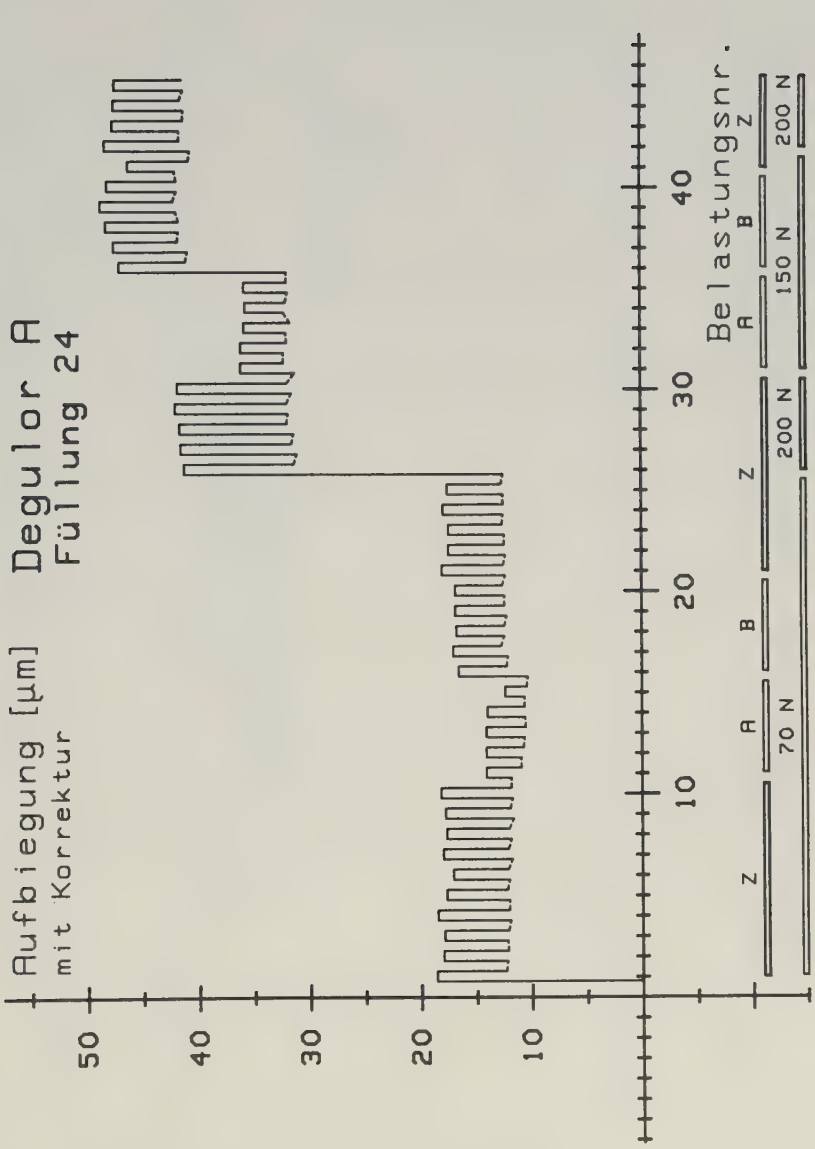


Abb. 47: modifiziertes Balkendiagramm der Aufbiegungen von Füllung 24 bei Zahn 4 mit mittlerer Kavität

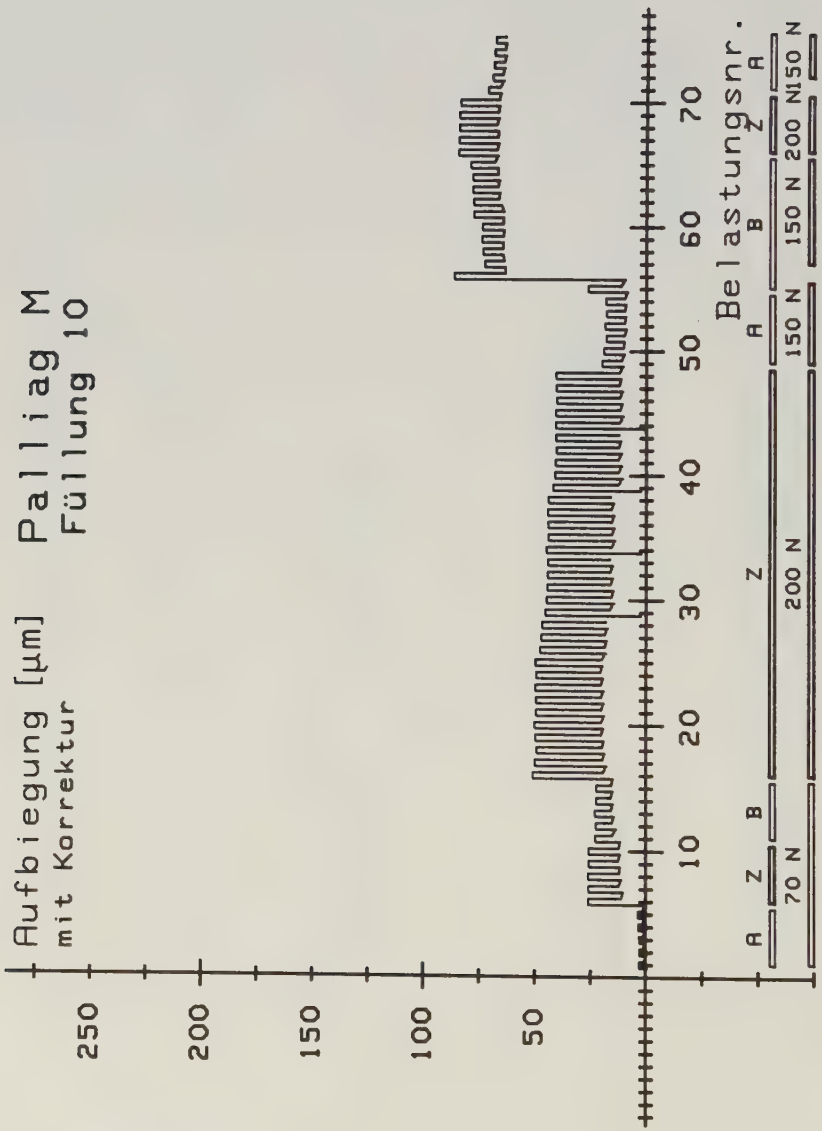


Abb. 48: modifiziertes Balkendiagramm der Aufbiegungen von Füllung 10 bei Zahn 1 mit zierlicher Kavität

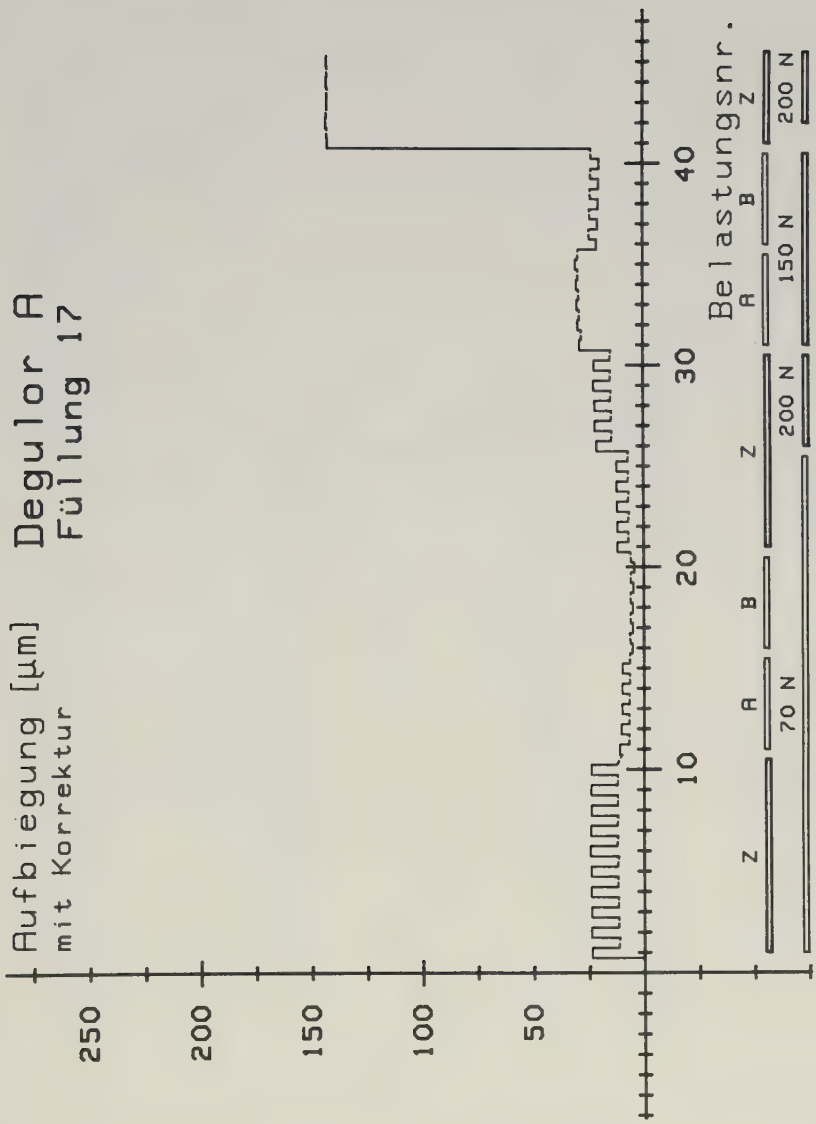


Abb. 49: modifiziertes Balkendiagramm der Aufbiegungen von Füllung 17 bei Zahn 2 mit zierlicher Kavität

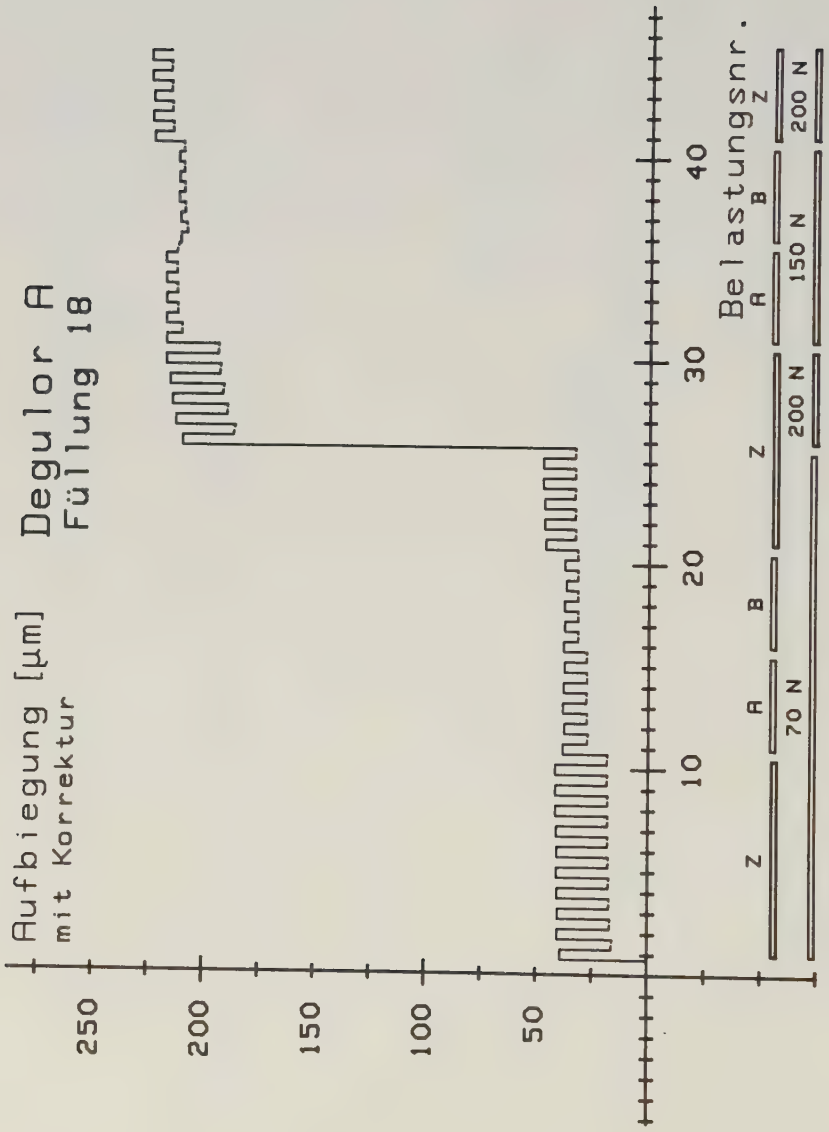


Abb. 50: modifiziertes Balkendiagramm der Aufbiegungen von Füllung 18 bei Zahn 2 mit zierlicher Kavität

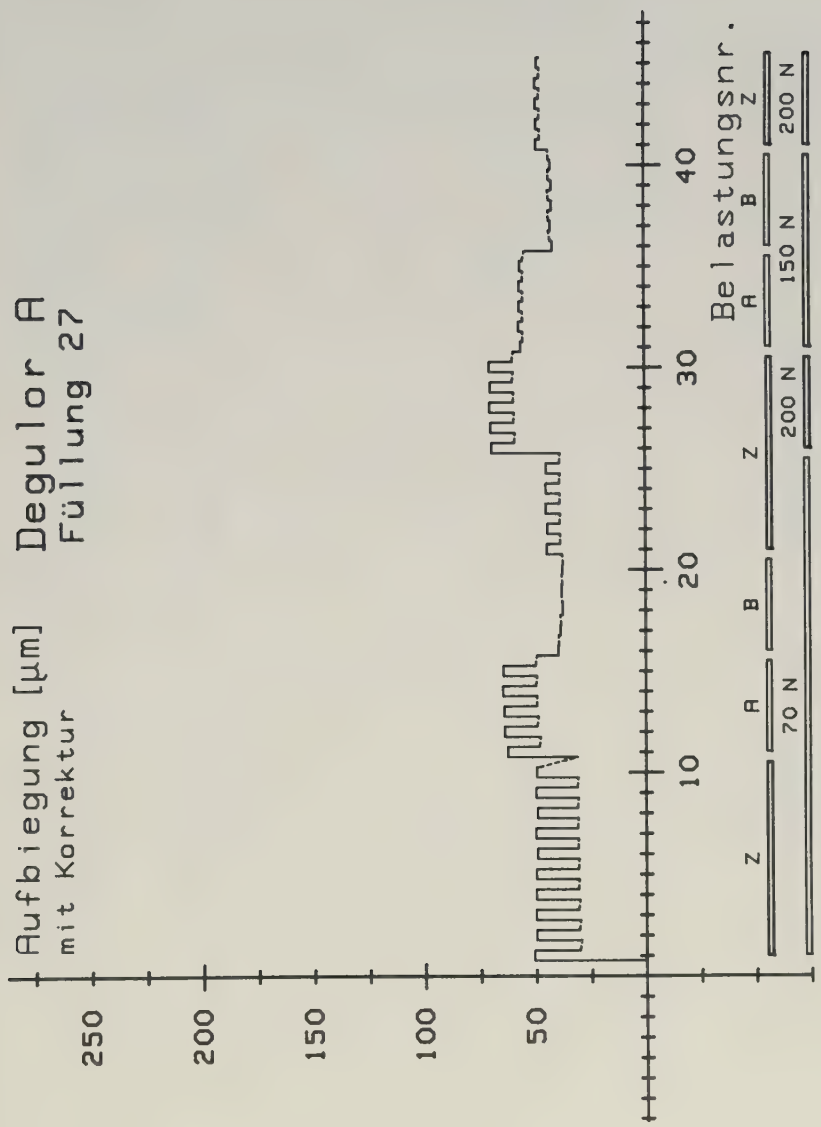


Abb. 51: modifiziertes Balkendiagramm der Aufbiegungen von Füllung 27 bei Zahn 3 mit zierlicher, untiefer Kavität

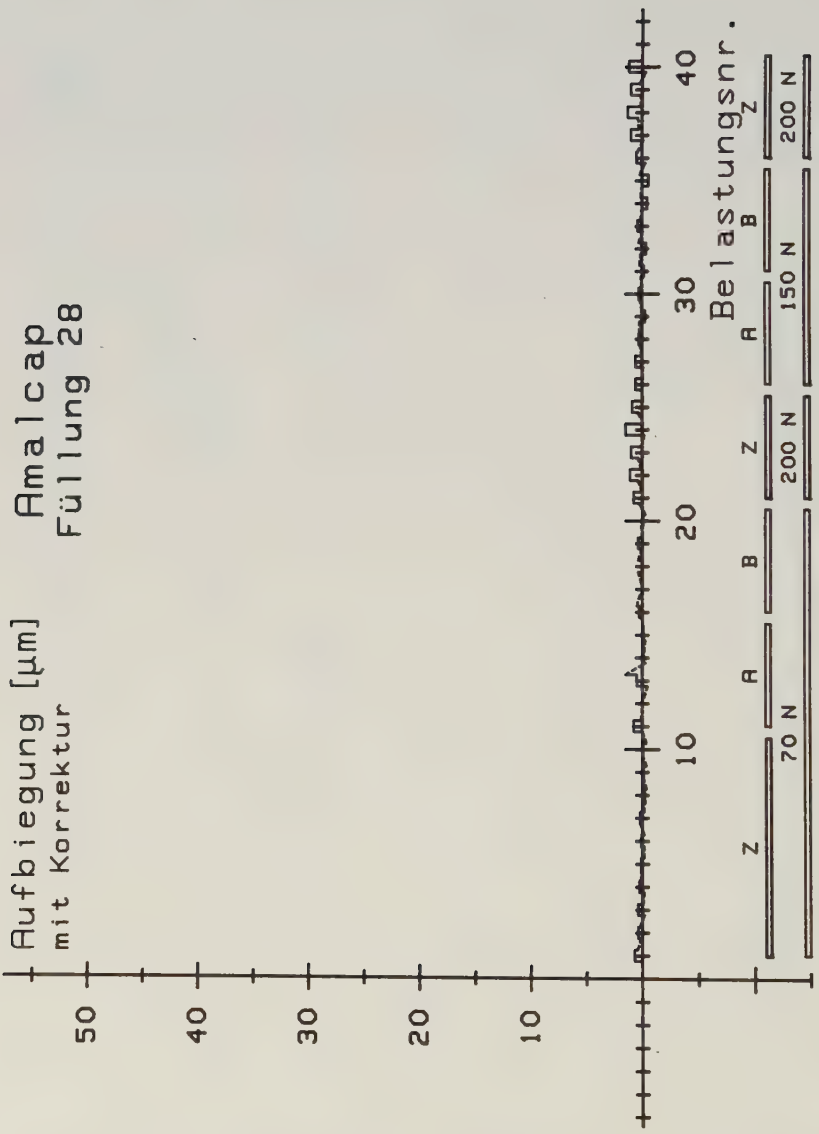


Abb. 52: modifiziertes Balkendiagramm der Aufbiegungen von Füllung 28 bei Zahn 1 mit zierlicher Kavität

in Abbildung 51 dargestellt. Das ungünstigste Palliag-Inlay (Inlay 10, Abb. 48) zeigt ungefähr ebenso große Aufbiegungen wie ein Degulor A-Inlay mit geringer Aufbiegung (Inlay 17, Abb. 49).

- 6. Amalgamfüllungen

Abbildung 52 zeigt im gewohnten Maßstab die Aufbiegung einer Amalgamfüllung: es ist nahezu keine Aufbiegung erkennbar.

An 4 Füllungen wird der Einfluß der Kippungen und deren Korrektur gezeigt: aufeinanderfolgend sind die Aufbiegungen der Füllungen ohne und mit Fehlerkorrektur abgebildet.
Die Kavitäten der in Abbildungen 53 bis 56 dargestellten Aufbiegungen sind von zierlicher Gestalt, die zugehörige Kavität von Abb. 57 und 58 ist zierlicher und weniger tief, die von Abb. 59 und 60 ist dagegen von mittlerer Größe.
Die Korrektur ändert scheinbare Aufbiegungen um bis zu 3 µm nach oben oder unten ab.

- 7. Übersichtsdarstellung

In Abb. 61 sind die typischen Aufbiegungen verschiedener Füllungsmaterialien bei den unterschiedlich präparierten Zähnen zu sehen:

Zähne 1 und 2 haben zierliche Kavitäten,
die Kavität von Zahn 3 ist zierlicher und weniger tief,
die von Zahn 4 hat eine mittlere Größe.

Je größer die Kavität ist, desto geringer sind die Aufbiegungen.
Deutlich am ungünstigsten schneidet Degulor A ab, der Unterschied zwischen Degulor M und Palliag M ist nicht eindeutig feststellbar. Die Tendenz zeigt eher, daß Füllungen aus Palliag M weniger aufgebogen werden als die aus Degulor M; aufbiegungsfreudige Inlays erschweren die genaue Aussage.

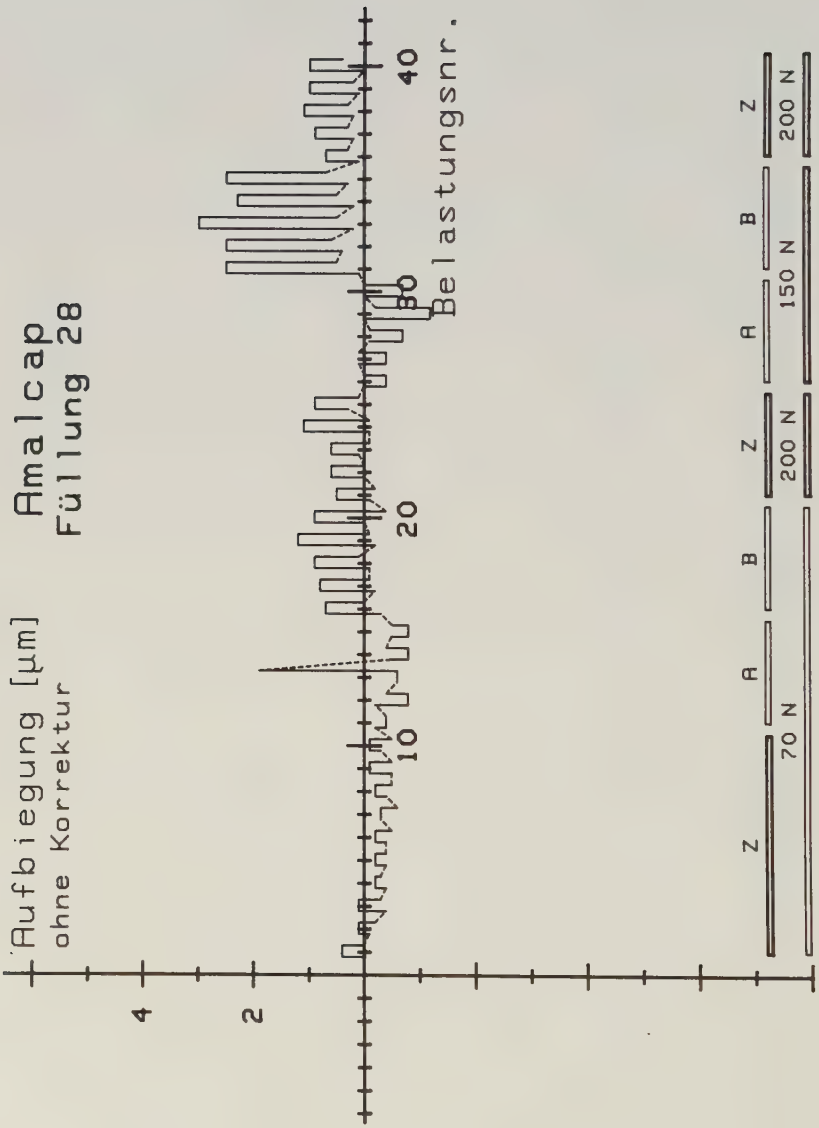


Abb. 53: modifiziertes Balkendiagramm der Aufbiegungen von Füllung 28 bei Zahn 1 mit zierlicher Kavität

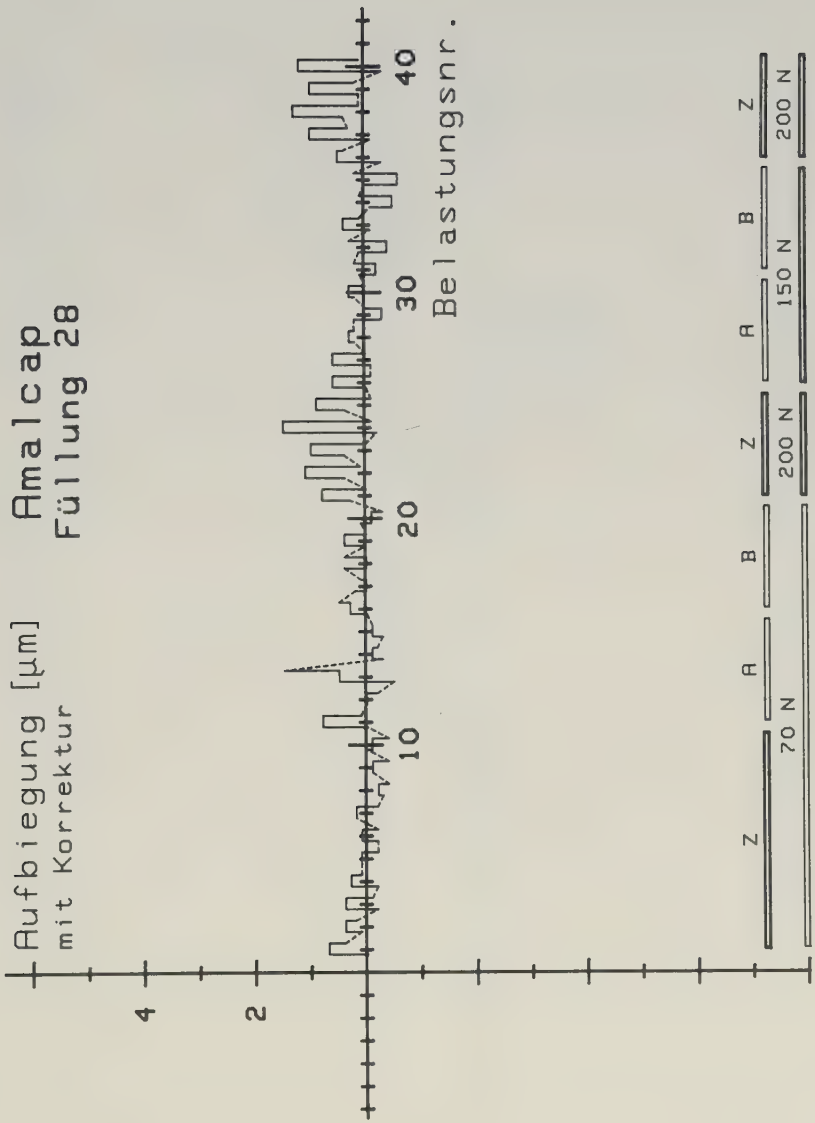


Abb. 54: modifiziertes Balkendiagramm der Aufbiegungen von Füllung 28 bei Zahn 1 mit zierlicher Kavität

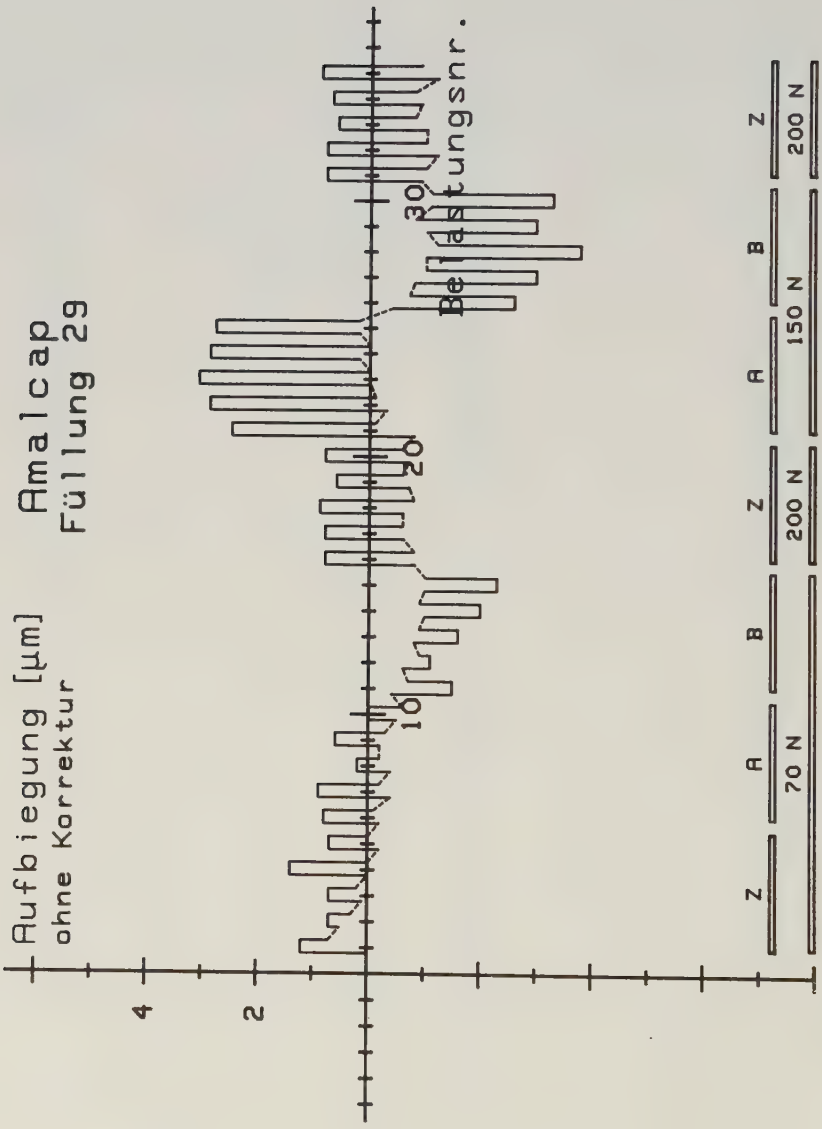


Abb. 55: modifiziertes Balkendiagramm der Aufbiegungen von Füllung 29 bei Zahn 2 mit zierlicher Kavität

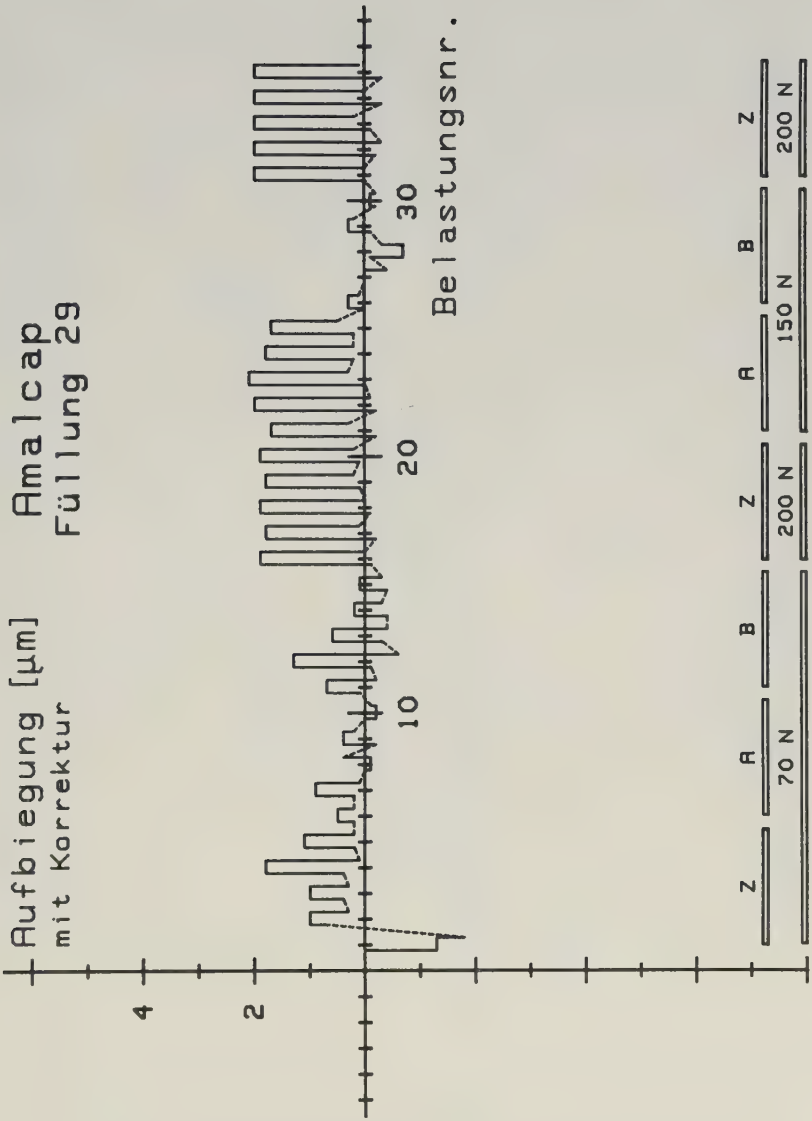


Abb. 56: modifiziertes Balkendiagramm der Aufbiegungen von Füllung 29 bei Zahn 2 mit zierlicher Kavität

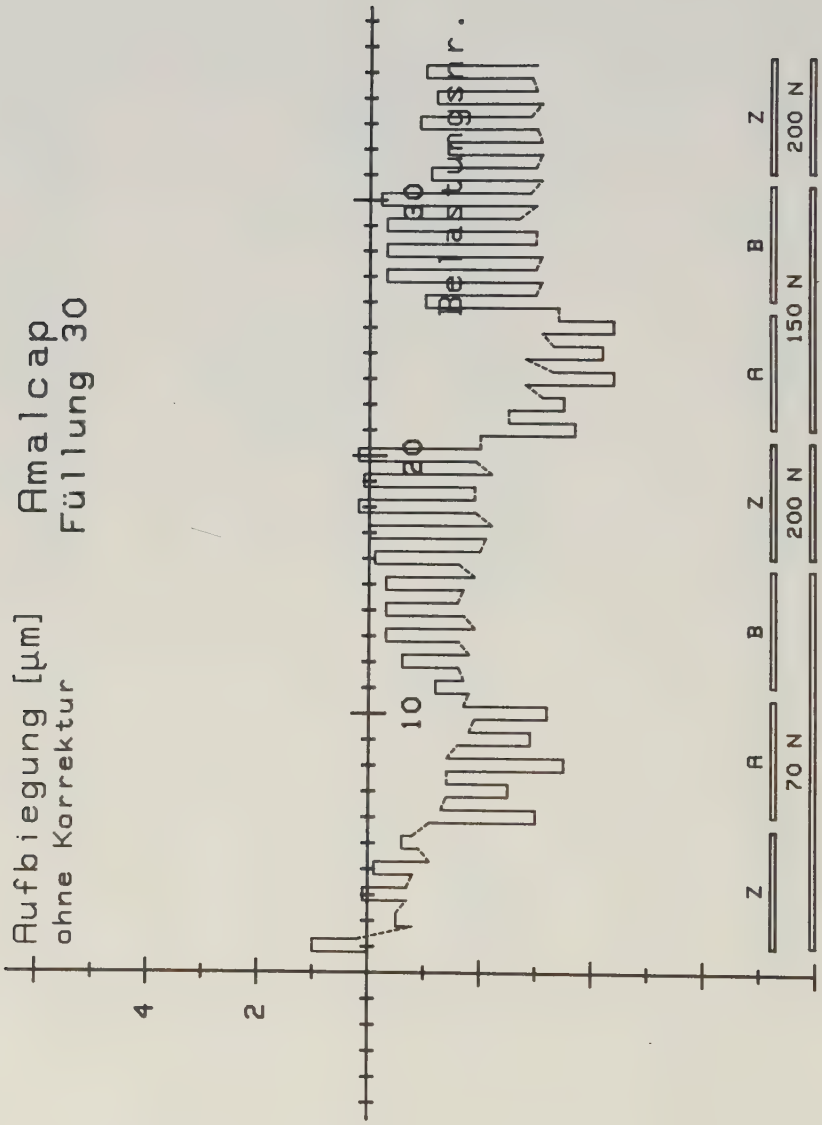


Abb. 57: modifiziertes Balkendiagramm der Aufbiegungen von Füllung 30 bei Zahn 3 mit zierlicher, untiefer Kavität

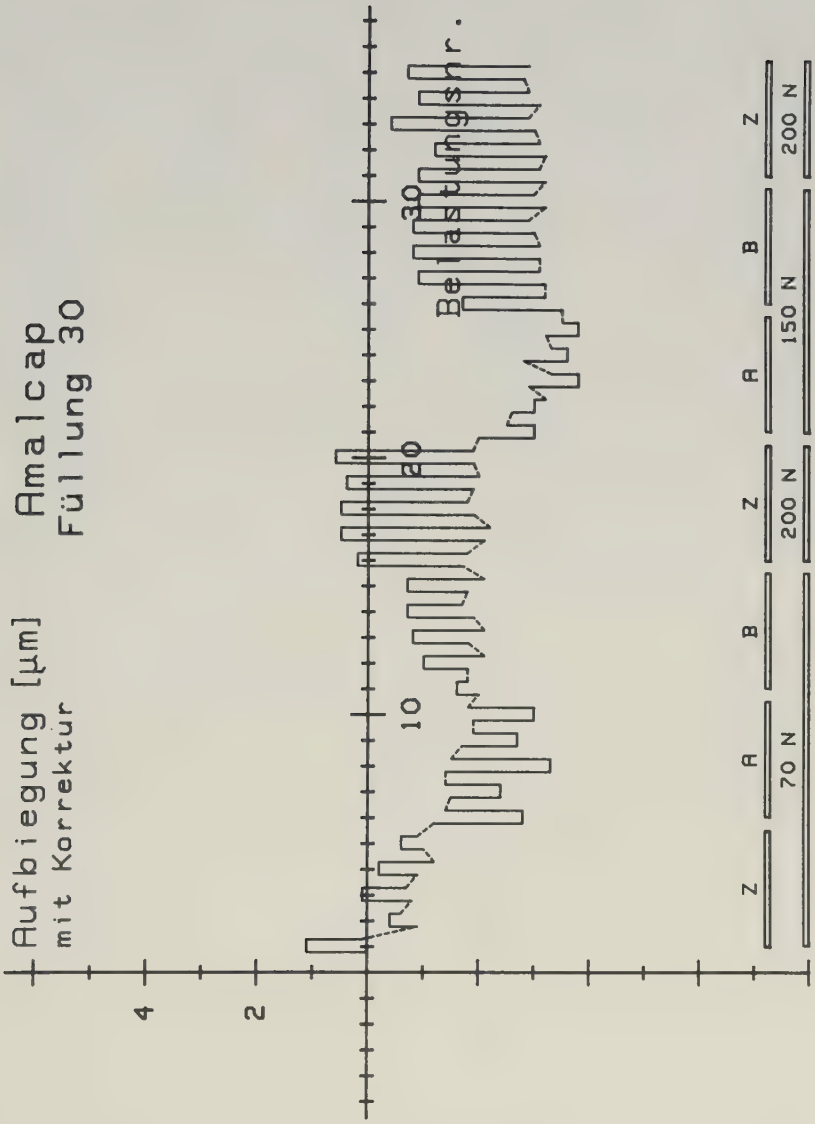


Abb. 58: modifiziertes Balkendiagramm der Aufbiegungen von Füllung 30 bei Zahn 3 mit zierlicher, untiefer Kavität

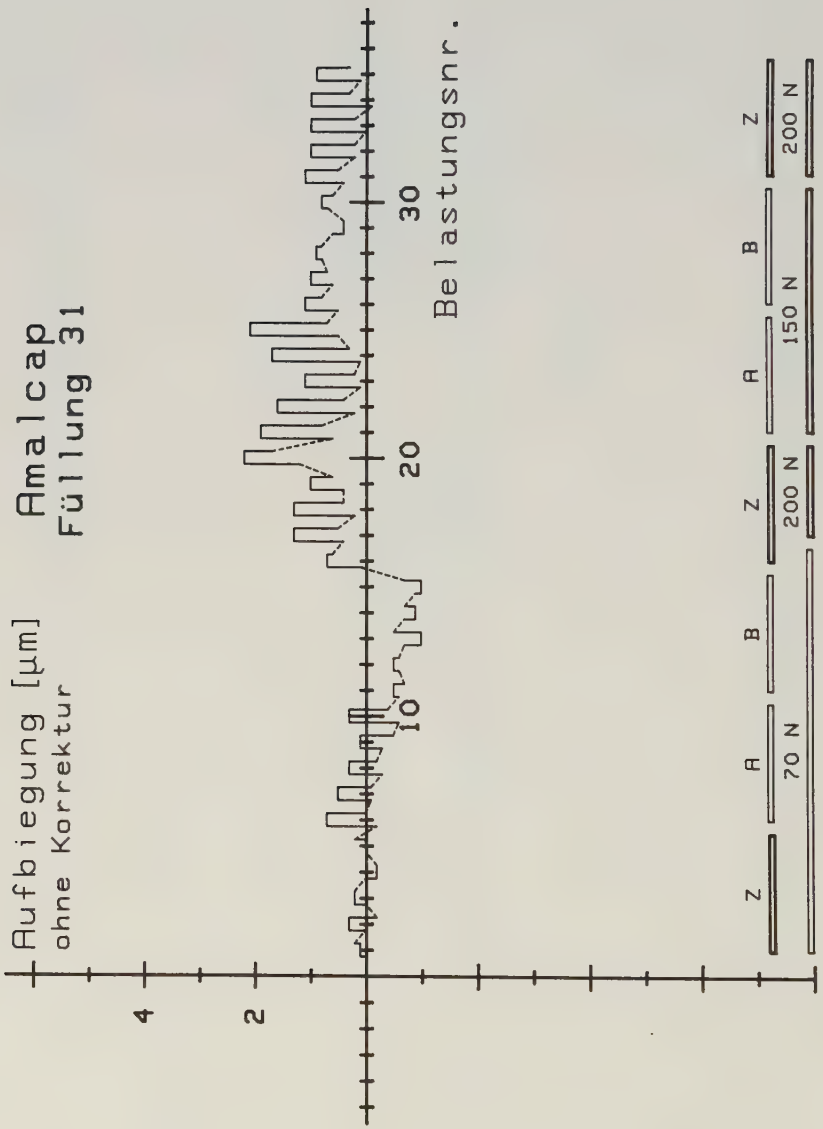


Abb. 59: modifiziertes Balkendiagramm der Aufbiegungen von Füllung 31 bei Zahn 4 mit mittlerer Kavität

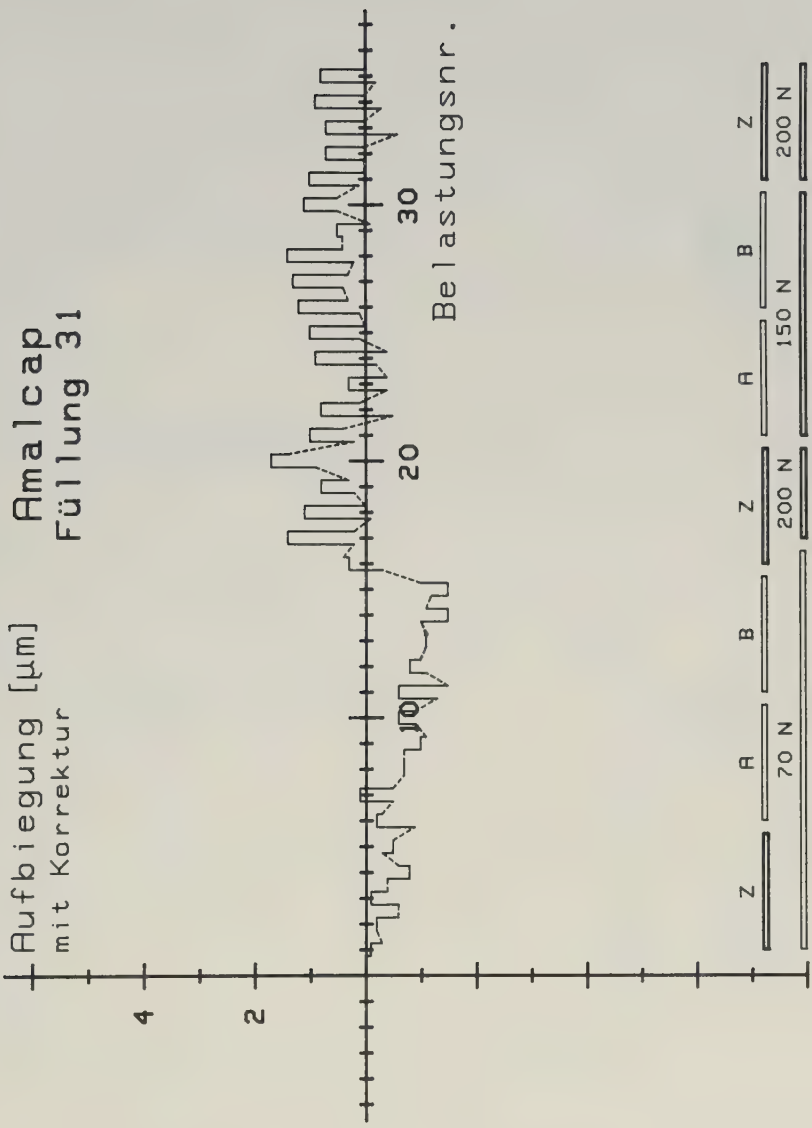
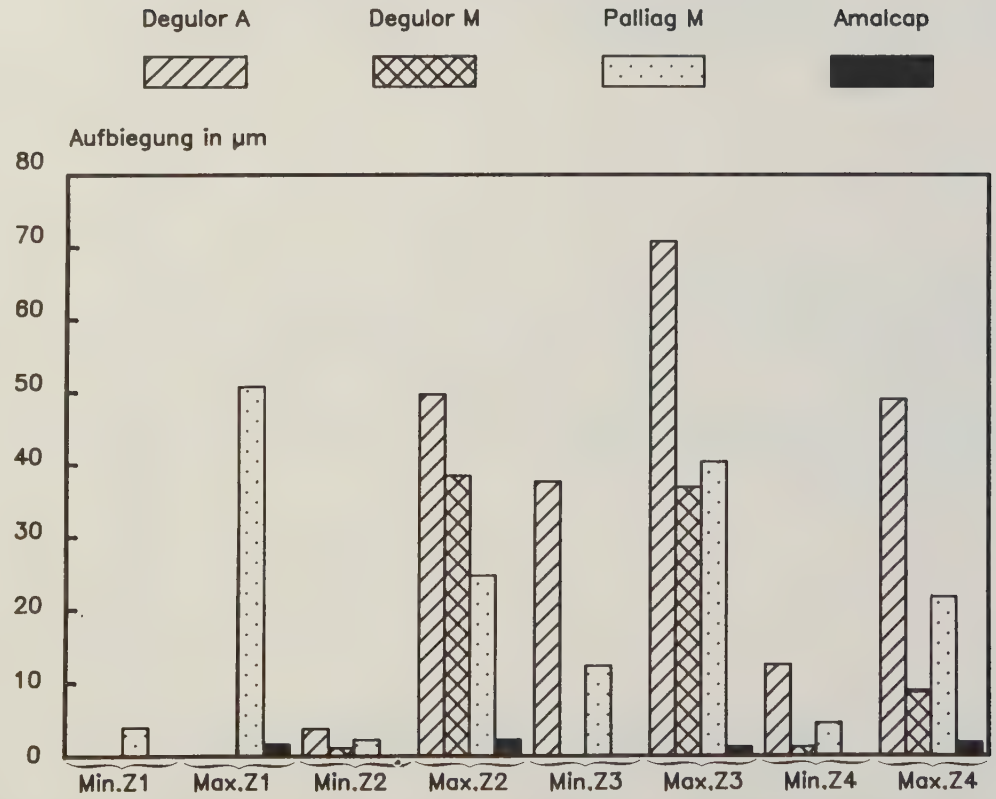


Abb. 60: modifiziertes Balkendiagramm der Aufbiegungen von Füllung 31 bei Zahn 4 mit mittlerer Kavität

Dynamische Aufbiegung

Vergleich verschiedener Materialien



minimale und maximale Aufbiegungen bei Zähnen 1 bis 4

Versuche nach Einwirkung von Kräften >200 N sind nicht enthalten

Abb. 61

Eine Sonderstellung nimmt Amalgam ein, das nahezu keine Aufbiegung zeigt - dies im Gegensatz zu den Vorversuchen, bei denen eine plastische Aufbiegung bei allerdings höheren Kräften festgestellt wurde.

2.2.5. Fehlerbesprechung:

Bei den vielen Geräten, die zur Durchführung der Versuche benötigt werden, gibt es zahlreiche mögliche Fehlerquellen.

- 1. Wegaufnehmer

- 1.1. seitliche Wegaufnehmer **A,B**

Bei der wiederholten Eichung waren bei einem Meßbereich von 100 µm 1,5 bis 2 % Abweichung festzustellen. Die mit 11 Endmaßen (in 10 µm--Schritten) vorgenommene Eichung zeigte einen Korrelationkoeffizienten von 0,9993 **(A)** bzw. 0,9996 **(B)** : dies weist auf eine gute Linearität der Wegaufnehmer hin.

- 1.2. obere Wegaufnehmer **1,2,3**

Die mit einer Meßrille von 9,1 $\pm$ 0,1 µm Tiefe vorgenommene Eichung zeigt maximale Abweichungen von 3% **(1)**, 4,5% **(2)** und 1,5% **(3)** auf; die mittleren Abweichungen bei verschiedenen Eichvorgängen beträgt weniger als die Hälfte.

- 2. Prüfmaschine

Die Eichung wird mit Hilfe eines Gewichtes mit der Masse von 20 kg vorgenommen.

- 2.1. INSTRON TTBM mit **Vv&F**

Bei wiederholter Eichung war eine Abweichung bis maximal 10% festzustellen. Außerdem gab es Spannungssprünge, deren Ursache wahrscheinlich bei Interferenzen von Synchronmotor und Frequenzgenerator zu suchen sind; sie nahmen kurzzeitig ein Ausmaß bis zu 10% des Gesamtmeßbereiches an, der mittlere Fehler lag bei 5%.

- 2.2. INSTRON 6025 mit Spannungsteiler

Die zu unterschiedlichen Zeitpunkten durchgeführten Eichungen wichen nur um maximal 0,07% voneinander ab.
Diese Universalprüfmaschine wurde bei allen Hauptversuchen benutzt.

- 3. Impedanzwandler und Multiplexer (**I&M**)

Der Fehler liegt weit unter allen übrigen Fehlern. Z.B. ist der Nullpunkt auf Werte unterhalb von 0,02 mV abgeglichen.
Fehler durch Einschwingvorgänge der Impedanzwandler werden durch das Programm so weit verringert, daß sie nicht mehr meßbar sind.

- 4. Analog-Digital-Wandler (**ADM 08**)

Die Wandlungsfehler sind maximal $\pm$ 2 Digit: $\pm$ 5 mV.

- 5. Meßmikroskop

An den Kurbeln lassen sich 1/100 mm ablesen, mit Hilfe der Noniusskala kann die Genauigkeit auf 1 µm-Schritte gesteigert werden.
Bei deutlich zu lokalisierenden Punkten, wie den Berührungspunkten von Wegaufnehmern mit dem Zahn oder der Füllung, ist folgende Reproduzierbarkeit festgestellt worden:

von 268 zweifach gemessenen Koordinaten war die Abweichung:
0,00 mm bei 96,
0,01 mm bei 136,
0,02 mm bei 30 und
0,03 mm bei 6 Meßwertparen.

Eine Abweichung über 0,03 mm wurde nicht gefunden.

- 6. Fehlerabschätzung

Die Fehler, die auf Ungenauigkeiten der Meßapparatur zurückzuführen sind, belaufen sich auf schätzungsweise weniger als 3% der Aufbiegung

bei einer Unsicherheit von ungefähr 2 µm.

Bei größeren Translationen in X-Richtung können sich die Fehler der Wegaufnehmer **A,B** summieren; deshalb sollte man das Ausmaß dieser Translation beachten. Die Translationen in X-Richtung blieben überwiegend unter 10 µm, bei 3 Belastungen waren ungefähr 50 µm zu messen, Werte bis 35 µm kamen mit einem Schwerpunkt bei 20 µm in weniger als 2% der Fälle vor. Addiert man die möglichen maximalen Fehler (2% vom Meßweg) der Wegaufnehmer **A** und **B**, dann kann eine Aufbiegung von 2 µm bei einer Translation von 50 µm simuliert werden.

Andere Fehler, die nicht auf die Messungen selbst zurückzuführen sind, werden in der Diskussion abgehandelt.

2.3. Diskussion

2.3.1. Beurteilung der Meßergebnisse

Die Meßfehler, die durch die verwendete Meßanordnung selbst verursacht wird, liegt bei 2 µm und 3% der Aufbiegung. Wie im Kapitel 'Fehlerbesprechung' (2.2.5.) gezeigt, ist bei großen Translationen eines Inlays in einer Kavität ein zusätzlicher maximaler Fehler von 2 µm, im Mittel jedoch nur von 0,5 µm aufgrund von Eichfehlern / -streuungen dazu zu addieren. Weiterhin spielen Kippungen des Zahnes und das Schaukeln des Inlays in der Kavität eine Rolle.

Aufbiegungen bei zentraler Belastung weisen aufgrund der nahezu nicht vorhandenen Kippung die genauesten Ergebnisse auf. Die Korrektur der Aufbiegung versagt manchmal aus dem Grunde, daß ein Inlay stärker kippen kann als der Zahn selbst. Dies sieht man z.B. an Abb. 62 und 63 . Abbildung 62 zeigt die Aufbiegung eines Inlays bei exzentrischer Belastung mit Korrektur der Meßwerte aufgrund der Kippungen des Zahnes. Wie man in Abb. 40 sehen kann, gibt es bei anderen Belastungspunkten eine positive Aufbiegung; nach Wechsel des Belastungspunktes verringert sich offenbar die gemessene Länge des Inlays. Das größere Ausmaß der Kippung des Inlays in der Kavität als das des Zahnes verursacht wahrscheinlich die Distanzabnahme zwischen den Wegaufnehmermeßflächen. Die zum Ausgangspunkt des Versuches (vor Belastung 36) relative Aufbiegung beträgt ohne Korrektur -39,4 µm , mit Korrektur -38,0 µm . Daraus ist ersichtlich, daß die Aufbiegung nicht solche negativen Werte aufweist, wie dies ohne Korrektur angedeutet wird. Es ist wahrscheinlich, daß ungefähr 10 µm negative Aufbiegung durch Kippung des Inlays verursacht werden:

es genügt dabei eine Kippung des Inlays um 1,5°.

Eine Verfeinerung der Versuchsanordnung ist aus Platzgründen kaum noch

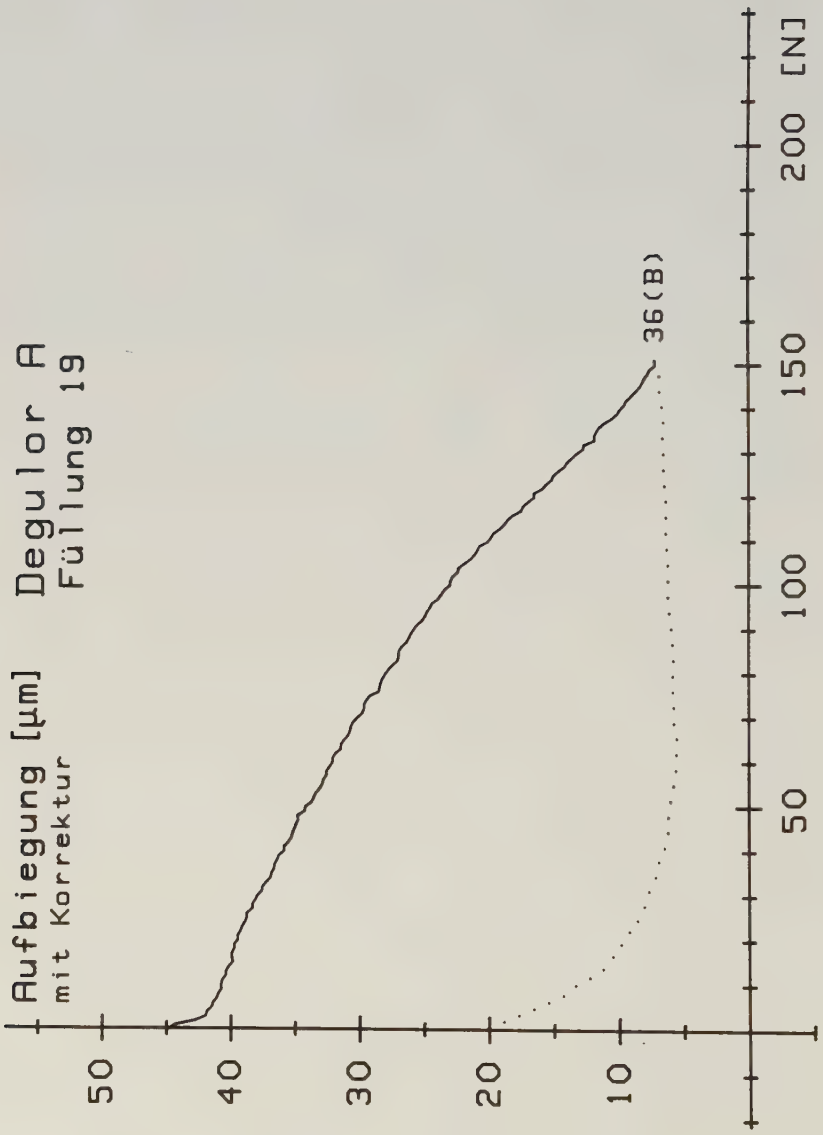


Abb. 62: kontinuierliche Aufbiegungskurve der 36. Belastung von Füllung 19

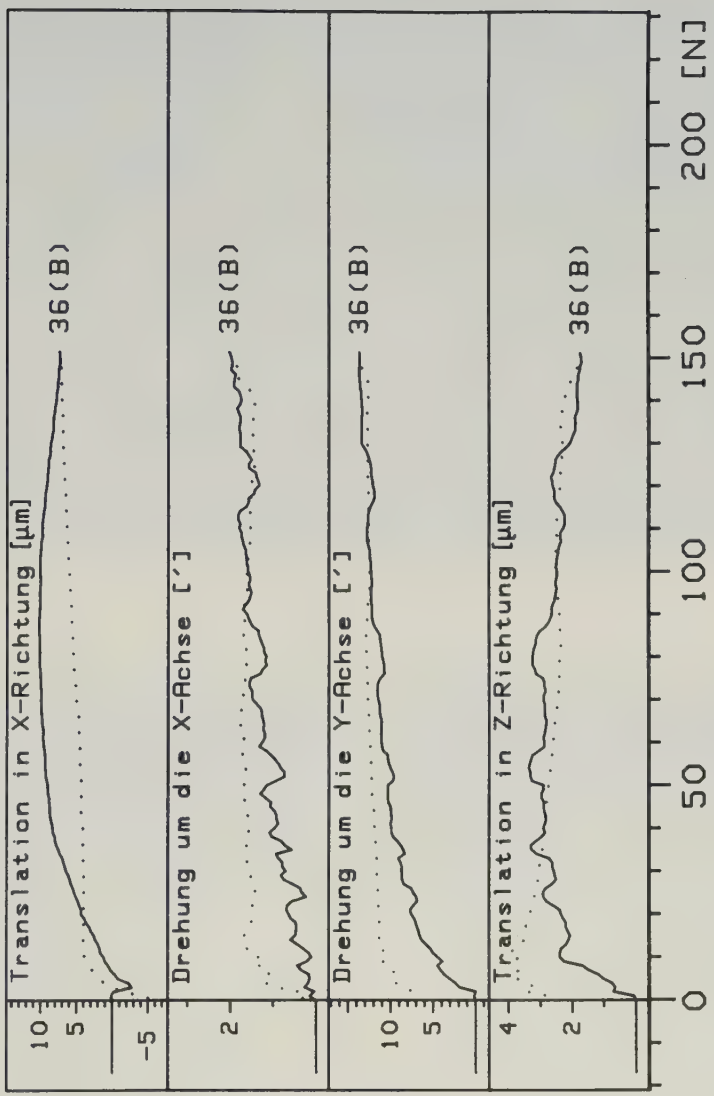


Abb. 63: Vierfach-Diagramm der kontinuierlichen Bewegung des 2. Zahnes bei 36. Belastung von Füllung 19

möglich, wie in Abbildungen 64 und 65 erkennbar ist.

Hieraus kann man vermuten, daß die relativ hohen Aufbiegungswerte bei Belastung des Inlays bei Kontaktpunkt **A** (Belastungsnummer 31 bis 35) zum Teil auch eine Folge des Schaukelns des Inlays in der Kavität ist. Wären die Inlays zementiert worden, ist zu vermuten, daß dieser Effekt nicht zum Ausdruck käme.

2.3.2. Faktoren, die die Aufbiegung beeinflussen können:

- 1. Retention

Bei Inlays ist das Zementieren, das bei allen Versuchen nicht zur Anwendung kam, um mehrere Inlays in derselben Kavität vergleichen zu können, eine Art Retention. Der Zement hat allerdings nur die Aufgabe, den vorhandenen Hohlraum zwischen Zahn und Inlay auszufüllen, um damit den Bakterien und dem Mundmilieu den Zugang zu pulpanahen Gebieten zu verwehren. Um Inlays einsetzen zu können, dürfen bei der Präparation keine Unterschneidungen vorhanden sein.

Da Inlays bei leicht konischer Präparationsform durch nichts gehindert werden, sich aufzubiegen, ist es verständlich, daß Amalgamfüllungen gegenüber Gußfüllungen zunächst Vorteile haben: da eine Retention an den Kavitätswänden gegeben ist, sollte man einen Vergleich zu Gußfüllungen erst bei Langzeitversuchen anstellen, da die hervorragenden Ergebnisse der Hauptversuche bei Amalgamfüllungen über längere Zeit wahrscheinlich nicht erreicht werden.

Um Inlays am Aufbiegen zu hindern, wären z.B. Präparationen denkbar, bei denen kurze parapulpäre Stifte die mesio-distale Länge des Inlays in Höhe der gingivalen Stufe halten würden. Der Nutzen solcher zusätzlichen Stifte wird bei kleinen Aufbiegungen zu gering sein, falls man überhaupt einen Unterschied feststellen kann.

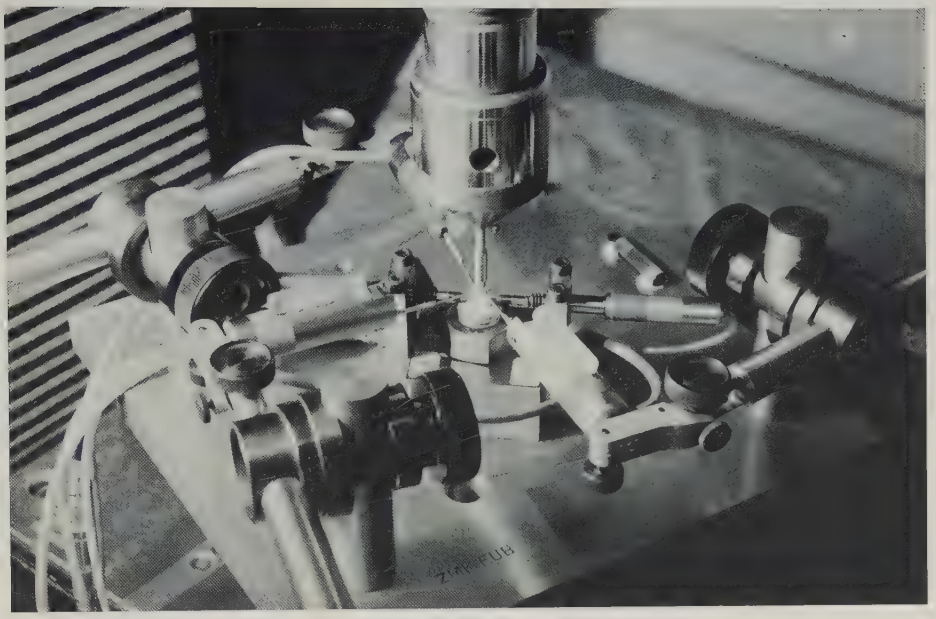


Abb. 64: Versuchsaufstellung in der Prüfmaschine

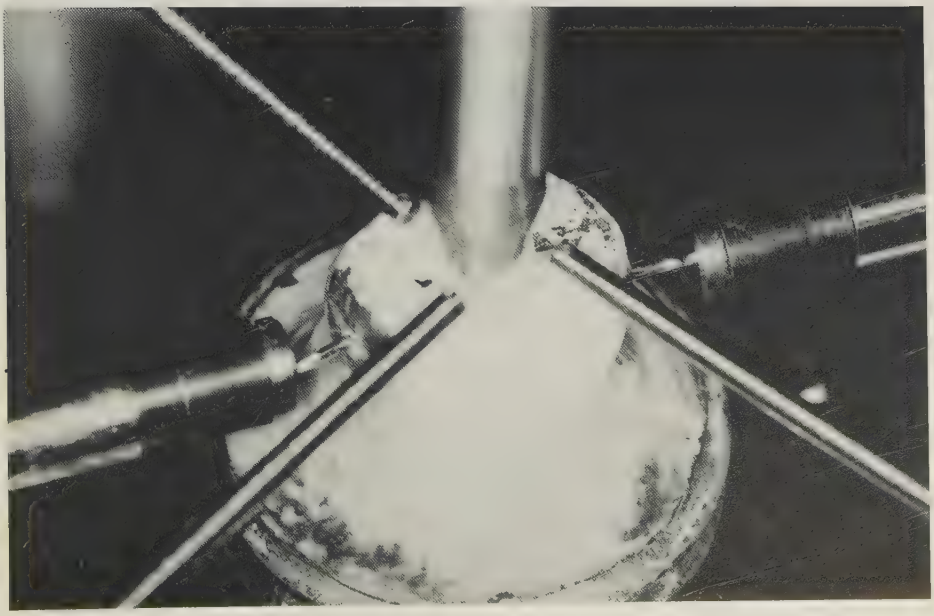


Abb. 65: Zahn mit Wegaufnehmern und Druckstempel

- 2. Paßungenauigkeiten der Inlays

Da bei dieser Untersuchung evtl. vorhandene Hohlräume zwischen Kavität und Inlay mit Zement nicht aufgefüllt wurden, ist es denkbar, daß z.B. ein Inlay bei Belastung auf den okklusalen Boden gedrückt wird, während die approximalen Schenkel bereits beim Eingliedern gut auf dem gingivalen Boden zu liegen kamen. Dadurch wären die individuellen Unterschiede zwischen Inlays eines Gusses bei demselben Zahn zu erklären.

- 3. approximaler Anschnitt/Anschliff

Eine Slice-Cut Präparation soll folgende Vorteile haben:

- geringer Verlust von Zahnhartsubstanz
- feine approximale Ausläufer, die angeglättet werden können.

Demgegenüber sind folgende Nachteile zu nennen:

- ein Anfinieren härtet die Legierung, wodurch die Bruchgefahr der Ausläufer stark erhöht wird [14]
- bei einer Aufbiegung in Längsachse der Füllung hat der Randspalt die volle Breite der Aufbiegung

Sinnvoll ist diese Präparationweise aus der Sicht der Aufbiegung dann erst, wenn sie in Kombination mit Retentionen (siehe - 1.) vorgenommen wird.

- 4. Einsetzen der Inlays

Die Inlays werden mit Fingerdruck in die Kavitäten gesetzt: ein Schaukeln in den Kavitäten war visuell nicht feststellbar. Da ein Patient beim Einzementieren eines Inlays üblicherweise Kraft ausübt, treten zwei Effekte auf:

1. Das Inlay kann sich etwas aufbiegen; nach dieser ersten Krafteinwirkung wird sich das Inlay bei späteren Krafteinwirkungen nicht mehr viel mehr aufbiegen.

2. Ein evtl. größer gewordener Spalt wird noch mit Zement ausgefüllt, wodurch weitere Kräfte auf eine größere Fläche verteilt werden.

- 5. Rotation um die Z-Achse

Diese wird bei den Berechnungen nicht weiter betrachtet. Die Gleichungen wären noch komplizierter und obendrein benötigte man noch weitere Wegaufnehmer, die man wegen Platzmangel nicht hätte unterbringen können. Zu einer Rotation um die Z-Achse benötigt man ein Kräftepaar. Da jedoch darauf geachtet wurde, daß der Druckstempel nicht auf eine schräge Fläche kommt, kann man davon ausgehen, daß die mögliche Wirkung vernachlässigbar ist. Eine Drehung um die Z-Achse bewirkt bei größtem Abstand der Kontaktflächen **A** und **B** ausschließlich eine 'Schrumpfung' des Inlays. Diese ist jedoch zum Kosinus des Drehwinkels proportional.

2.3.3. Lokalisieren der Aufbiegung

Bei dieser Versuchsaufstellung wird zwar die Lage der mesialen und distalen Berührungspunkte der Füllungen zu den Wegaufnehmern erfaßt, jedoch kann bei den Versuchen nicht die Aufbiegung einer bestimmten Seite angegeben werden, da weder Rotationzentrum noch die echte Translation des Zahnes in X-Richtung meßbar oder berechenbar ist.

2.3.4. Energieabsorption

Durch Einwirken der Kraft wird bei weicheren Materialien (z.B. Goldlegierung Typ 1) die Oberfläche bleibend verformt. Dadurch können lokal hohe Belastungszonen vom Füllungsmaterial ohne die Intervention des Zahnarztes abgebaut werden. Kiefergelenksstörungen können somit zusätzlich vermieden werden. Es sollte jedoch bei Gefahr der Fraktur eines Höckers eher zum Onlay gegriffen werden als zum Inlay, denn damit kann man einer Frakturierung des Zahnes besser vorbeugen als mit einem rigiden Füllungsmaterial für ein Inlay.

2.3.5. Vergleich zwischen künstlichem und natürlichem Kauvorgang

Die Kraftentfaltung geht beim natürlichen Kauvorgang in viel kürzerer Zeit (0,1 s) vonstatten als beim hier verwendeten künstlichen Kauvorgang, der zwischen 7 s und 30 s bis zur maximalen Kraft benötigt.

Es ist bei den Versuchen zwar eine Dynamik vorhanden, diese spiegelt jedoch bei weitem nicht die des alltäglichen Geschehens wider. Mit Hilfe einer Universalprüfmaschine ist eine wesentlich kürzere Kraftentfaltung mit Begrenzung der maximalen Kraft nicht möglich. Die Kürze der benötigten Kraftentfaltung ist eher mit der Zeitdauer eines Stoßes zu vergleichen; dies hat jedoch den Nachteil, daß die einwirkende Kraft schwer meßbar ist, eher ist die Energieabsorption der Füllung meßbar.

Bei Gußfüllungen wird der Unterschied nicht so bedeutend sein, bei Amalgamfüllungen werden die Ergebnisse mit Sicherheit ungünstiger ausfallen. Die Vielzahl der Lastwechsel ist über die Jahre bei klinischen Füllungen bedeutend größer.

2.3.6. Klinische Bedeutung

Die Aufbiegung der Füllungen unter Einwirkung von Kaukräften ebenso wie unter parafunktionellen Bewegungen und Kräften spielt sicherlich eine Rolle bei der Bildung eines Randspaltes. Diese Rolle ist um so größer je genauer die technische Verarbeitung der Füllungsmaterialien möglich ist. Bei einem Randspalt während der Herstellung eines Inlays von 150 µm (OEHLKE [14]) spielt sie vom Ausmaß sicherlich noch keine große Rolle. Man sollte trotzdem bedenken, daß durch Bewegungen, die in einem Inlay durch Krafteinwirkung entstehen, die umliegenden Zementpartikel mit bewegt bzw. gelockert werden können, wodurch der Halt teilweise verloren geht und der Zement leichter ausgewaschen werden kann.

Bei Amalgamfüllungen sieht es anders aus: der zunächst bessere Randschluß

ist ziemlich stark den Aufbiegungs-Bewegungen bzw. -Kräften ausgesetzt. Durch Flow und Creep, d.h. durch das Fließen von Amalgam unter Belastung, steigert sich das Ausmaß der Aufbiegungen in vielen kleinen Schritten. Wegen der viel geringeren Randständigkeit bröckelt eher etwas von der Füllung ab, wodurch die Spalten vergrößert und danach die Retentionen (Rauhigkeiten) an den Wänden der Kavität verringert werden. Die hier gefundenen guten Ergebnisse für Amalgamfüllungen müssen aufgrund der klinischen Erfahrungen in Zweifel gezogen werden. Hier müßten weitere Untersuchungen eine Klärung bringen.

Bevor man eine allgemeine Entscheidung trifft, welches der Füllungsmaterialien am besten geeignet ist, sollte man den Randschluß der Füllungen zum Zeitpunkt der Herstellung und nach längerem Gebrauch beachten, der deutlich über den Werten der Aufbiegung gelegen ist.

Weichere Goldlegierungen sind bei mehrflächigen Füllungen eher mit Vorsicht zu verwenden als härtere, sie sind jedoch sicherlich nicht vollkommen abzulehnen.

3. ZUSAMMENFASSUNG

Diese Arbeit untersucht die mesio-distale Längenänderung von Füllungen aus Goldlegierungen Typ 1, Typ 4, Silberpalladiumlegierung (Palliag M) und kupferreiches Amalgam (Amalcap SAS Non-Gamma 2) bei unterschiedlicher Kavitätengröße unter Kaubelastungen.

Beim Meßverfahren wird die Kippung des Zahnes gemessen und bei der Auswertung berücksichtigt.

Um die Meßdaten schneller auswerten zu können, wird die Erfassung der Meßwerte mit Hilfe von 2 Computern und mehreren Peripheriegeräten, die z.T. selbst entwickelt und hergestellt wurden, vorgenommen. Alle notwendigen Programme zum Eichen der Meßgeräte, zum Ausrichten der induktiv arbeitenden Wegaufnehmer und zum Erfassen der Meßdaten wurden selbst entwickelt.

Es sind 1492 Versuche an 4 unteren Molaren mit insgesamt 31 Füllungen durchgeführt worden.

Zum Auswerten der 6,5 Millionen Meßwerte (13,5 MByte) werden alle Programme auf einem weiteren, jedoch viel leistungsfähigeren Computersystem, selbst entwickelt.

Zehn Füllungen (Palliag-Inlays) zeigten, daß die Aufbiegungen einer Füllung bei gleicher Kraft ziemlich konstant sind, dies sowohl bei mehrfachem Wechsel der Füllung als auch bei erneutem Einspannen des Zahnes; zwischen den verschiedenen Füllungen bestehen jedoch größere Unterschiede.

Die Inlays sind nicht zementiert worden, da sonst ein Wechsel der Füllungen nicht möglich gewesen wäre. Dadurch ist nur der ungünstigste Fall berücksichtigt.

Folgende Erkenntnisse sind festzustellen (Tab. 6 bis 13):

Bei 17 Inlays aus Palliag M findet wenig bleibende Aufbiegung (2 µm) statt; die dynamische Aufbiegung liegt bei 70 N im Bereich von 7 µm,

bei 200 N im Bereich von 15 µm (im Einzelfall bis 50 µm) insgesamt auf beiden Seiten.

Bei 5 Inlays aus Degulor M sind die dynamischen Aufbiegungen im günstigsten Fall bei denen von Palliag M, meist sind sie mit 14 µm (70 N) bzw. 30 µm (200 N) jedoch von doppeltem Ausmaß. Die bleibenden Aufbiegungen liegen bei 5 µm.

Die 5 Inlays aus Degulor A zeigen die größten Aufbiegungen: sie sind mit 30 µm (70 N) bzw. 40 µm (200 N) ungefähr 3-mal so groß wie die von Palliag M; die bleibende Aufbiegung liegt bei 25 µm auf beiden Seiten zusammen.

Die 4 Amalgamfüllungen der Hauptversuche wiesen starke Abweichungen zu den Vorversuchen auf. In den Hauptversuchen ist die dynamische Aufbiegung bei maximal 2 µm, eine bleibende Verformung konnte nicht registriert werden. Bei den Vorversuchen, bei denen die maximale Krafteinwirkung oberhalb von 300 N lag, war eine plastische Aufbiegung festzustellen. Der Einfluß der Zahnkippungen auf die Meßergebnisse macht sich überwiegend bei geringen Aufbiegungen (unter 5 µm) der Füllungen bemerkbar. Am bedeutendsten für das Ausmaß der Aufbiegungen ist jeweils die 1. Belastung bei jeder erstmalig zuvor nicht ausgeübten Kraft auf die Füllung: sehr deutlich wird dieses bei weichen Goldlegierungen, die durch Einwirken der Kräfte einer Kalthärtung unterzogen werden.

Schrifttumsverzeichnis

1. ALBERT, H.-M. — Spaltbreiten und -tiefen bei Amalgam- und Gußfüllungen. Med. Diss. FU Berlin 1966
2. BARTSCH, H.-J. — Taschenbuch mathematischer Formeln. Verlag Harri Deutsch, 3.-6. Auflage. Thun - Frankfurt/M. 1982
3. COMBE, E. C. dtsch. Ausg. von DERMANN, K. — Zahnärztliche Werkstoffe. Zusammensetzung, Verarbeitung, Anwendung. Carl Hanser Verlag München Wien 1984
4. DE BOEVER, J. A., Mc CALL, W. D. HOLDEN, S. und ASH, M. M. — Functional occlusal forces: An investigation by telemetry. J. Prosth. Dent. 40, 326-333 (1978)
5. DEGUSSA — Degussa Dental-Legierungen. Technische Daten, Massengehalte. Stand Oktober 1984, Degussa Frankfurt/M.
6. DERMANN, K. — Das SI-Einheiten-System. Dtsch. Zahnärztl. Z. 33, 653-656 (1978)
7. DIN 13906 — Goldgußlegierungen. Dtsch. Institut für Normung. Februar 1982
8. EICHNER, K. und ROHRBACH, Chr. — Messung der Kräfte beim Kauvorgang mit Widerstandsmeßdosen von Molarengröße ohne Behinderung der Okklusion und Artikulation. Dtsch. Zahnärztl. Z. 13, 146-155 (1958)

9. EICHNER, K. Kraftmessungen bei Kauvorgängen im prothetisch versorgten Gebiß Medizinische Habilitationsschrift 1961, F.U.Berlin

10. EICHNER, K. Messung der Kräfte bei Kauvorgängen Dtsch. Zahnärztl. Z. 18, 915-924 (1963)

11. EICHNER, K. Aufschlüsse über den Kauvorgang durch elektronische Kaukraftmessungen Dtsch. Zahnärztl. Z. 19, 415-426 (1964)

12. GERLACH, K. L. und NUßBAUM, P. Elektrisches Meßverfahren zur Bestimmung der Belastbarkeit des Unterkiefers bei Patienten mit vollbezahntem Gebiß Dtsch. Zahnärztl. Z. 39, 146 - 149 (1984)

13. MARXKORS, R. und MEINERS, H. Taschenbuch der zahnärztlichen Werkstoffkunde. 1. Aufl., Hanser, München Wien 1978

14. OEHLKE, W. Die klinische Ungenauigkeit von Gußfüllungen bei der Verwendung von ausgewählten zahnärztlichen Edelmetall-Legierungen Med. Diss. FU Berlin 1968

15. Von Schlichtegroll, R. und ZIRPEL, M. Sharp PC-1500 Systemhandbuch München 1982

16. VON SCHLICHTEGROLL, R. Sharp PC-1500 Macroassembler München 1983

17. SHARP Pocket Computer PC-1500 Technical Reference Manual Sharp Corporation 1983

18. SOLTÉSZ, U. Zur Randspaltöffnung von Klasse II Füllungen unter statischer Belastung - Finit-Element-Modellrechnung - Vortrag Dtsch. Ges. für Zahnerhaltung Ulm, 12.11.1983

19. UHLIG, H. Über die Kaukraft Dtsch. Zahnärztl. Z. 8, 30-45, (1953)

20. VIOHL, J Kunststoff-Füllungswerkstoffe In: EICHNER, K.: Zahnärztliche Werkstoffe und ihre Verarbeitung 4. Aufl., Bd. 2, S.125 - 158 Hüthig, Heidelberg 1981

Bedienungsanleitungen und Datenbücher der Halbleiterhersteller sind hier nicht aufgeführt.

Verzeichnis der verwendeten Geräte

Hochglanzpoliermaschine

Logitech LTD Scotland PM2 Precision Polishing Maschine

Paralleldrücker

Jean Wirtz

Mikroskope

Zeiss Stereomikroskop
Kamera mit Belichtungsmesser MC 63

Nikon Meßmikroskop (Measurescope)

Prüfmaschine

Instron TTBM (alt) mit selbstgebautem Vorverstärker mit Filtern (**Vv & F**)

Instron Model 6025 (neu)

Wegaufnehmer

Mahr Feinprüf Nr.1301 mit 2 Meßgeräten Millitron (**A,B**)

Mahr Ständer zur Aufnahme der Wegaufnehmer bei der Eichung

Endmaße von 1,00 mm bis 1,10 mm in 0,01 mm Schritten

Mahr Perthen BFRW 750e mit Perthometer PAU (3 Zwischenschaltkästen) und 3 Meßgeräten Perthometer C3A (**1, 2, 3**)

Mahr Perthen Eichrille von 9,1 µm Tiefe

Impedanzwandler mit Multiplexer (**I & M**) (Selbstbau)

Ansteuereinheit (**AE**) (Selbstbau)

Fernauslöser

Fernbedienung (Selbstbau) für 6-Kanal Schreiber

6-Kanal Schreiber

Linseis

Analog-Digitalwandler mit HP-IB Interface

Karstaedt ADM-08 (**ADM 08**)

Computer mit Einschüben und Peripherie:

1. Sharp PC-1500A Pocket Computer
   Sharp CE-161 16 kByte Speichererweiterung
   Speidel Experimenter PC 1505 (enthält Portbaustein
   LH 5811 von Sharp (Teil der Ansteuereinheit))
   Sharp CE-158 parallele und serielle Schnittstelle
   für PC-1500A
   Tram-Soft Toolkit zur Programm- und Datenabspeicherung
   auf Cassette
   Sharp CE-152 Datenrecorder
2. Hewlett Packard HP-85A Computer mit
   16 kByte Speichererweiterung,
   HP-IB Interface und
   folgenden ROMs:
   Printer Plotter ROM
   IO ROM (Input Output)
   Mass Storage ROM
   Hewlett Packard HP 7225A Plotter
3. Hewlett Packard HP 9920S Computer mit DIN-Tastatur,
   monochromem Monitor und
   folgenden Einschüben:

DATACOMM Interface (HP 98628)

R G B - Interface (HP 98627A) für Farbgraphik

Speichererweiterung auf 1,17 MByte

Hewlett Packard HP 9121D 3,5" Diskettenlaufwerk
(2*270 kByte formatiert)

Hewlett Packard HP 9133 XV 15 MByte Festplatten-
laufwerk mit 3,5" Diskettenlaufwerk (270 kByte)

Hewlett Packard HP 7475A Plotter

Hewlett Packard HP 2934A Drucker

Conrac R G B - Monitor

Sonstiges:

5 Libellen zum Ausrichten der Wegaufnehmer **1, 2, 3**

PEAK Scale Lupe 7x (von SAM 2-Artikulatorzubehör)
zum Vermessen der Inlayachse

6. Programm zur Meßdatenerfassung

Programm : MOD DISC2

```
10   ! Programm 'MOD DISC2' geschrieben von Martin
     ZIMMER 23.9.1984,9.12.1984
20   CLEAR
30   INTEGER D,F,G,K,L,N,R,S,V,W,Z
40   REAL H
50   DIM M$[5],MO$[5],N$[6],T$[6],U$[4],W$[1]
60   ! GOTO 370 @ DIM D$[15128],G$[253],I$[195],H$[68],
     P$[253]
70   DISP "BITTE 'DIM'-ANWEISUNG ÜBERPRÜFEN" @ BEEP 25,
     2000 @ LIST 60,60 @ KEY LABEL @ END
80   ! VARIABLE D : DATENART
90   !   D=1 ZAHLEN mit VORZEICHEN
100  !   D=2 ZAHLEN rechtsbündig
110  !   D=3 ZAHLEN linksbündig
120  ! VARIABLE F : FLAGGE für ABSPEICHERUNG der DATEN
130  ! VARIABLE G : FLAGGE für automatische
     Grundparameter
140  ! VARIABLE H : HILFSVARIABLE
150  ! VARIABLE K : KOORDINATENNAME
160  ! VARIABLE L : LÄNGE des SUBSTRING
170  ! VARIABLE N : HILFSVARIABLE
180  ! VARIABLE R : DATENRICHTUNG
190  !   R=1 EINGABE
200  !   R=2 AUSGABE
210  !   R=3 AUSGABE und ÄNDERUNG
220  ! VARIABLE S : STARTADRESSE IM STRING P$
230  ! VARIABLE V : VERSUCHSNUMMER
```

```
240   ! VARIABLE W : WEGAUFNEHMERNUMMER
250   ! VARIABLE Z : ZÄHLER für wiederholten
      UNTERPROGRAMMAUFRUF
260   ! VARIABLE D$: DATEN-PUFFER
270   ! VARIABLE G$: GESAMT-DATEN-FILE HILFSVARIABLE
280   ! VARIABLE H$: HILFSVARIABLE
290   ! VARIABLE I$: INLAY-VERSUCHSNUMMERN
300   ! VARIABLE M$: DATEN-MEDIUM
310   ! VARIABLE MO$: PROGRAMM-MEDIUM
320   ! VARIABLE N$: FILE-NAME
330   ! VARIABLE P$: PARAMETER-VARIABLE
340   ! VARIABLE T$: TAGESDATUM
350   ! VARIABLE U$: UHRZEIT
360   ! VARIABLE W$: WEGAUFNEHMERNAME
370   F=0
380   MO$=":D700"
390   M$=":D701"
400   DISP "DATEN-MEDIUM ist: ";M$
410   INPUT H$
420   IF H$="" THEN 450
430   M$=H$
440   MASS STORAGE IS M$
450   P$[253]=" "
460   CLEAR
470   GOSUB 480 @ GOTO 580
480   ON KEY# 1,"Versuch " GOSUB 1110
490   ON KEY# 2," ZEIT ?" GOSUB 950
500   ON KEY# 3,"OUTinfo" GOSUB 1470
```

```
510   ON KEY# 4," ->DISC " GOSUB 2300
520   ON KEY# 5," ->ZEIT " GOSUB 840
530   ON KEY# 6,"O/Iinfo" GOSUB 1530
540   ON KEY# 7,"IN info" GOSUB 1300
550   ON KEY# 8,"PRINTinfo" GOSUB 1590
560   RETURN
570   ! ----------------------
580   DISP "GRUNDPARAMETER VOLLAUTOMATISCH"
590   INPUT H$
600   IF H$>"" THEN 710
610   ON ERROR GOTO 690
620   ASSIGN# 2 TO "EICH P"&MO$
630   READ# 2 ; H$,V,I$
640   ASSIGN# 2 TO *
650   G=1 @ OFF ERROR
660   P$[17,52]=H$
670   GOSUB 840
680   GOTO 760
690   OFF ERROR
700   ! ----------------------
710   G=0
720   FOR N=1 TO 3
730   ON N GOSUB 800,840,990
740   NEXT N
750   ! ----------------------
760   CLEAR
770   KEY LABEL
780   GOTO 770
```

```
790   ! ----------------------
800   DISP "LETZTE VERSUCHSNUMMER insgesamt"
810   INPUT V
820   RETURN
830   ! ----------------------
840   DISP "EINGABE des DATUMS (TAG.MONAT)"
850   GOSUB 2650
860   T$=H$&"84"
870   DISP "EINGABE der UHRZEIT (STD.MIN)"
880   GOSUB 2650
890   SETTIME (VAL(H$[1,2])*60+VAL(H$[3]))*60,0
900   IF F=0 THEN U$=H$
910   DISP "DATUM: ";T$[1,2]&"."&T$[3,4]&"."&T$[5]
920   DISP "ZEIT: ";U$[1,2];":";U$[3,4]
930   RETURN
940   ! ----------------------
950   GOSUB 2670
960   GOSUB 900
970   GOTO 480
980   ! ----------------------
990   R=1
1000  DISP "UMRECHNUNGSFAKTOREN:"
1010  FOR W=1 TO 6
1020  W$=CHR$((W<3 OR W=6)*18+W+46)
1030  DISP " 1 Volt bei ";W$;" sind (µm bzw. Kp):"
1040  S=11+W*6
1050  GOSUB 2740
1060  NEXT W
```

```
1070   RETURN
1080   ! ----------------------
1090   ! ----------------------
1100   ! MESSWERTEINGABE VON AD-M
1110   IF F=1 THEN 1250
1120   IOBUFFER D$
1130   CLEAR 704
1140   OUTPUT 704 ;"0"
1150   G=SGN(G)
1160   F=1
1170   BEEP 10,99
1180   TRANSFER 704 TO D$ FHS
1190   BEEP 8,99
1200   V=V+1
1210   GOSUB 2670
1220   U$=H$
1230   GOTO 1300 ! ENDE TRANSFER
1240   ! ----------------------
1250   DISP "DATEN sind noch NICHT abgespeichert !!!"
1260   BEEP 20,400 @ BEEP 7,500 @ BEEP 15,400 @ BEEP 6,900
1270   GOTO 2300
1280   ! ----------------------
1290   ! EINGABE DER INLAY-PARAMETER
1300   CLEAR
1310   R=1 ! DATENRICHTUNG 'EINGABE'
1320   FOR N=1 TO 12
1330   IF (G>0)*N*(R=1)=3 THEN 1420
1340   Z=0
```

```
1350   ON N GOSUB 1640,1680,1770,1810,1850,1900,1940,1980,
       2050,2130,2210,2250
1360   Z=Z-1
1370   IF R=2 THEN 1410
1380   IF L>0 THEN 1400
1390   IF Z<1 THEN 1420 ELSE 1350
1400   P$[S,S+L-1]=H$[1,MIN(L,LEN(H$))]
1410   IF Z>0 THEN 1350
1420   NEXT N
1430   GOSUB 3240
1440   RETURN
1450   ! ------------------------
1460   ! AUSGABE ALLER PARAMETER
1470   R=2 @ CLEAR
1480   GOSUB 3440
1490   GOSUB 1320
1500   RETURN
1510   ! ------------------------
1520   ! ÄNDERUNG DER INLAY-PARAMETER
1530   R=3 @ CLEAR
1540   GOSUB 1320
1550   GOSUB 3240
1560   RETURN
1570   ! ------------------------
1580   ! AUSDRUCK ALLER PARAMETER
1590   CRT IS 2
1600   GOSUB 1470
1610   CRT IS 1
```

```
1620   RETURN
1630   ! ------------------------
1640   L=2 @ S=53 @ D=2
1650   DISP "INLAYNUMMER"
1660   GOTO 2750
1670   ! ------------------------
1680   L=1 @ S=55 @ D=3
1690   DISP "INLAY-MATERIAL:"
1700   DISP TAB(3);"1 = DEGULOR A"
1710   DISP TAB(3);"2 = DEGULOR M"
1720   DISP TAB(3);"3 = PALLIAG M"
1730   DISP TAB(3);"4 = AMALGAM (AMALCAP)"
1740   DISP TAB(3);"5 = ADAPTIC"
1750   GOTO 2750
1760   ! ------------------------
1770   IF G=1 AND R=1 THEN RETURN
1775   L=3 @ S=56 @ D=2
1780   DISP "VERSUCHSNUMMER bei diesem Inlay"
1790   GOTO 2750
1800   ! ------------------------
1810   L=1 @ S=59 @ D=3
1820   DISP "LAGE DES DRUCKSTEMPELS (A-Z-B)"
1830   GOTO 2750
1840   ! ------------------------
1850   DISP "Nummer der Meßwertgruppe bei"
1860   L=4 @ S=60 @ D=2
1870   DISP "- VORSCHUBSTOP"
1880   GOTO 2750
```

```
1890  ! ------------------------
1900  L=4 @ S=64 @ D=2
1910  DISP "- RÜCKSCHUBBEGINN"
1920  GOTO 2750
1930  ! ------------------------
1940  L=4 @ S=68 @ D=2
1950  DISP "- VERSUCHSENDE"
1960  GOTO 2750
1970  ! ------------------------
1980  ON ERROR GOTO 2010
1990  IF VAL(P$[68,71])<VAL(P$[64,67]) OR VAL(P$[64,67])<
      VAL(P$[60,63]) THEN N=4 @ GOTO 2020
2000  IF VAL(P$[68,71])>1260 THEN N=6 @ GOTO 2020
      ELSE 2030
2010  OFF ERROR @ N=4 @ R=1
2020  BEEP 8,999
2030  L=0 @ RETURN
2040  ! ------------------------
2050  IF Z=0 THEN Z=15
2060  W=(18-Z) DIV 3
2070  W$=CHR$((W<3)*18+W+46)
2080  K=(18-Z) MOD 3+1
2090  DISP TAB(5);CHR$(K+87);" - KOORDINATEN VON ";W$
2100  S=162-6*Z
2110  GOTO 2740
2120  ! ------------------------
2130  IF Z=0 THEN Z=3
2140  S=180-6*Z
```

```
2150   IF Z=1 THEN 2180
2160   DISP "TANGENS v.HÖCKEREBENE zu ";CHR$(91-Z);
       " - ACHSE"
2170   GOTO 2740
2180   DISP "SCHNITTPUNKT HÖCKEREBENE mit Z - ACHSE"
2190   GOTO 2740
2200   ! ----------------------
2210   S=180
2220   DISP "TANGENS v.INLAYACHSE zu X - ACHSE"
2230   GOTO 2740
2240   ! ----------------------
2250   L=68 @ S=186 @ D=3
2260   DISP "BEMERKUNGEN:"
2270   GOTO 2750
2280   ! ----------------------
2290   ! FILE ERSTELLUNG UND SPEI-CHERUNG
2300   N=NUM(P$[2,2])
2310   N$="MZ"&P$[3,6]
2320   ON KEY# 5," CAT " GOSUB 2620
2330   KEY LABEL
2340   ON ERROR GOTO 2380
2350   CREATE N$&M$,N
2360   OFF ERROR
2370   GOTO 2520
2380   OFF ERROR @ BEEP 7,999
2390   IF ERRN<>60 THEN 2420
2400   DISP "DISKETTE IST 'WRITE PROTECTED'"
2410   INPUT H$@ GOTO 2340
```

```
2420  IF ERRN<>63 THEN 2452
2430  DISP "FILE-NAME IST DOPPELT!"
2440  R=1
2450  GOSUB 800 @ V=V+1 @ GOTO 3240
2452  IF ERRN<>128 THEN 2460
2454  DISP "Diskette ist voll !!"
2456  DISP "Bitte leere Diskette in rechtes Laufwerk
      einlegen"
2458  GOTO 2410
2460  IF ERRN<>130 THEN BEEP 8,999 @ DISP "ERROR ";ERRN;
      " in ";ERRL @ RETURN
2465  GOSUB 2470 @ GOTO 2340
2470  DISP "IST DISKETTE IM RECHTEN LAUFWERK?"
2480  DISP "SOLL DISKETTE INITIIERT WERDEN?  'INI'
      DRÜCKEN (";M$;")"
2490  INPUT H$
2500  IF H$="INI" THEN INITIALIZE N$,M$
2510  RETURN
2520  ASSIGN# 1 TO N$&M$
2530  PRINT# 1,1 ; P$
2540  FOR I=2 TO N
2550  G$=CHR$(I)&D$[1+(I-2)*252,(I-1)*252]
2560  PRINT# 1,I ; G$
2570  NEXT I
2580  ASSIGN# 1 TO *
2590  SECURE N$&M$,"MZ",2
2600  F=0
2610  RETURN
```

```
2620   ON ERROR GOSUB 2470
2621   CAT M$
2622   DISP ,,,,,,
2623   OFF ERROR
2625   RETURN
2630   ! ----------------------
2640   ! UHRZEIT
2650   INPUT H$
2660   IF POS(H$,".")=0 OR LEN(H$)>5 THEN 2650 ELSE 2680
2670   H$=VAL$(IP(TIME/3600))&"."&VAL$(IP(RMD(TIME,
       3600)/60))
2680   IF POS(H$,".")=2 THEN H$="0"&H$
2690   IF LEN(H$)=4 THEN H$=H$[1,3]&"0"&H$[4]
2700   H$=H$[1,2]&H$[4,5]
2710   RETURN
2720   ! ----------------------
2730   ! UMWANDLUNG von vorzeichenbehafteten 5 (L)
       stelligen ZAHLEN in STRING und umgekehrt
2740   L=6 @ D=1
2750   ON R GOTO 2770,3100,3150
2760   ! EINGABE VON WERTEN
2770   INPUT H$
2780   IF H$>"" THEN 2870
2790   GOSUB 3100
2800   ON ERROR GOTO 2850
2810   IF VAL(P$[S,H])=0 THEN H$="0"
2820   OFF ERROR
2830   L=0
```

```
2840   RETURN
2850   OFF ERROR
2860   IF D<3 THEN H$="0" ELSE 3060
2870   ON D GOTO 2880,3020,3040
2880   ON ERROR GOTO 2980
2890   H=VAL(H$)
2900   OFF ERROR
2910   H$="+"&VAL$(ABS(H))
2920   IF SGN(H)<0 THEN H$[1,1]="-"
2930   IF POS(H$,".")=0 THEN H$=H$&"."
2940   H$=H$&"0000"
2950   RETURN
2960   ! ------------------------
2970   IF R=1 THEN RETURN
2980   Z=1 @ L=0
2990   OFF ERROR
3000   RETURN
3010   ! ------------------------
3020   H$="       "&H$
3030   H$=H$[LEN(H$)-L+1]
3040   RETURN
3050   ! ------------------------
3060   L=0
3070   RETURN
3080   ! ------------------------
3090   ! AUSGABE VON WERTEN
3100   H=MIN(S+L-1,LEN(P$))
3110   DISP TAB(20);P$[S,H]
```

```
3120  RETURN
3130  ! ----------------------
3140  ! ABÄNDERUNG VON WERTEN
3150  GOSUB 3100
3160  GOTO 2770
3170  ! ----------------------
3180  ! VERSUCHSNUMMER insgesamt
3190  H$=VAL$(V9)
3200  L=4
3210  GOTO 3020
3220  ! ----------------------
3230  ! P$ ERGÄNZEN
3240  P$[1,1]=CHR$(1)
3250  P$[2,2]=CHR$(CEIL(VAL(P$[68,71])/21+1))
3260  L=4
3270  H$=VAL$(V)
3280  GOSUB 3020
3290  P$[3,6]=H$
3300  P$[7,16]=T$&U$
3305  GOSUB 3440
3310  IF F*G<>1 THEN RETURN
3320  H=3*VAL(P$[53,54])
3330  H$=VAL$(VAL(I$[H-2,H])+1)
3340  L=3
3350  GOSUB 3020
3360  I$[H-2,H]=H$
3365  P$[56,58]=H$
3370  ASSIGN# 2 TO "EICH P"&MO$
```

```
3380   PRINT# 2 ; P$[17,52],V,I$
3390   ASSIGN# 2 TO *
3400   G=2
3405   IF P$[59,59]=" " THEN BEEP @ GOTO 1810
3410   RETURN
3420   ! ----------------------
3430   ! AUSGABE DER AUTOMATISCH ERZEUGTEN PARAMETER
3440   DISP "ANZAHL DATENBLÖCKE: ";NUM(P$[2,2])
3450   DISP "NUMMER des VERSUCHES: ";P$[3,6]
3460   GOTO 910
3470   ! ----------------------
```

Mein erster Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Professor Dr. J. Viohl, der mir diese Arbeit anvertraute. Sein Vertrauen hat mir die Kraft gegeben, mich der Lösung der mir gestellten Aufgabe zu verschreiben.

Auch danke ich seinem Diplomphysiker Herrn Privatdozent Dr. K. Dermann für seine freundliche und hilfsbereite technische Einführung in die Bedienung der vorhandenen klinikeigenen Geräte.

Mein besonderer Dank gilt auch Herrn Professor Dr. R.-R. Miethke, da er mir neben meiner Weiterbildung in der Kieferorthopädie die Durchführung der vorliegenden Arbeit sowohl zeitlich als auch durch die Benutzung des modernen und leistungsstarken kieferorthopädischen Computersystems ermöglichte.

Lebenslauf

Am 6.10.1958 wurde ich in Bremen als Sohn des Fachzahnarztes für Kieferorthopädie Gottfried Zimmer und seiner Ehefrau Christa, geb. Hagen, geboren.

In Wilhelmshaven ging ich von 1965 bis 1968 zur Volksschule Allerstraße.

Anschließend besuchte ich in Wilhelmshaven das Gymnasium "Max-Planck--Schule" von 1968 bis 1977 und erhielt mein Zeugnis der Reife = Abitur am 25. April 1977.

Im Juli 1977 habe ich mich für das Zahnmedizinstudium an dem Reichsuniversitären Zentrum von Antwerpen (Belgien) eingeschrieben.
Im August und September 1977 bereitete ich mich intensiv auf die flämische Sprache vor.
Im Oktober 1977 begann ich mein Zahnmedizinstudium in Antwerpen (Belgien) am Reichsuniversitären Zentrum von Antwerpen (RUCA).
Am 28. September 1979 erhielt ich dort das Physikum und den akademischen Grad "Kandidat der Zahnheilkunde" nach erfolgreich abgeschlossenen Prüfungen 1978 und 1979.
Da eine Weiterführung des Zahnmedizinstudiums in Antwerpen nach dem Physikum nicht möglich war, wechselte ich anschließend nach Gent (Belgien).
Im Oktober 1979 führte ich mein Studium an der Reichsuniversität von Gent (RUG) weiter und erhielt nach insgesamt $4\,^{3}/_{4}$-jährigem Studium im Alter von 23 Jahren nach erfolgreich abgeschlossenen Prüfungen 1980, 1981 und 1982 am 14. Juli 1982 das belgische Staatsexamen.

Am 19. November 1982 erhielt ich die deutsche Approbation.

Im September 1982 erhielt ich das Thema dieser Dissertation und begann mit den Vorversuchen.

Vom 1. Oktober 1983 bis 31. März 1984 arbeitete ich als "Gastzahnarzt" ganztägig, vom 1. April 1984 bis jetzt als wissenschaftlicher Mitarbeiter in der kieferorthopädischen Abteilung unter der Leitung von Herrn Professor Dr. med. dent. R.-R. Miethke in der Zahnklinik Nord der FU-Berlin zum Zwecke der Weiterbildung in der Kieferorthopädie.

Die Hauptversuche wurden von Oktober 1984 bis Februar 1985 durchgeführt. Die Auswertung der Versuche streckte sich durch den großen Programmieraufwand bis Ende Juni 1985 hin.